INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



EL GIRASOL

Julio 1981

250 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 58
Julio 1981

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Salvador Bordas: *Ahorro de combustible en vehículos ligeros;* Santiago Torres Martínez: *Genes fragmentados;* Manuel Puigcerver: *Las fuentes de brotes celestes de rayos X;* Montserrat Domingo: *La cresta de la dorsal del Pacífico oriental;* Luis Palacios: *Sistemas de contracorriente en los animales;* Ramón Pascual de Sans: *Atomos altamente excitados;* Juan Manuel Martínez Moreno: *El girasol;* Luis Bou: *Temas metamágicos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Miguel Cordero del Campillo, Sebastián Xambó y Mercedes Durfort

Libros:

Silverio Palafox, Ramón Margalef y Mariano Artigas



LA PORTADA

La pintura de la portada representa parte de un campo de girasoles en cultivo comercial (véase "El girasol", por Benjamin H. Beard). El interés del cultivo reside en la producción de semillas, especialmente las que contienen el 40 por ciento o más de aceite. En la última década, el girasol oleaginoso, al que corresponde la pintura de la portada, ha llegado a dominar la industria, en parte por la creciente demanda de aceite de girasol en Europa, y gracias, en parte, a las mejoras genéticas introducidas en la planta, que hacen más remunerador su cultivo. Más de un millón de hectáreas se dedican en los Estados Unidos al cultivo del girasol, que, a escala mundial, sigue inmediatamente al de la soja como fuente de aceites vegetales. Los campos de girasoles se recolectan con una cosechadora, cuando las plantas se han vuelto ya quebradizas.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$

Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81

Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Enid Kotschning

Página	Fuente
9	George V. Kelvin
10-14	Albert E. Miller
15	Albert E. Miller (*arriba*), George V. Kelvin (*abajo*)
16-19	Albert E. Miller
23	Pierre Chambon y Bunji Tagawa
24-26	Bunji Tagawa
27	Pierre Chambon y Bunji Tagawa
28-29	Bunji Tagawa
30	P. Chambon y B. Tagawa
31	Bunji Tagawa
32	Pierre Cambon y Bunji Tagawa
33-34	Bunji Tagawa
39-44	Ian Worpole
45	Ian Worpole (*arriba*); National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey (*abajo derecha*); Martha H. Liller, Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (*abajo izquierda*)
46-48	Ian Worpole
57	Dudley Foster
58	William R. Normark (*arriba*) John A. Orcutt (*abajo*)

Página	Fuente
60-62	Andrew Tomko
63	Rachel Haymon
64	J. Douglas Macdougall
65	Patricia J. Wynne
66	Andrew Tomko
67-71	Andrew Tomko
75-79	Tom Prentiss
80	Ralph Morse (*arriba*) Tom Prentiss (*abajo*)
83-84	William P. Spencer
85-91	Ilil Arbel
92	William P. Spencer
93	Ilil Arbel
94	Wiliam P. Spencer
96	Ilil Arbel
101	Don C. Zimmerman
102	Don C. Zimmermann (*arriba*), Ralph Morse (*abajo*)
103-105	Ilil Arbel
106	Sunflower Association of America (*arriba*), Don C. Zimmerman (*abajo*)
108	Sunflower Association of America
111-118	Manuel Moles
119	Manuel Moles (*arriba*) H. Arp, Observatorios Hale (*abajo*)
120-121	H. Arp, Observatorios Hale
134-139	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

CHARLES L. GRAY, JR., y FRANK VON HIPPEL ("Ahorro de combustible en vehículos ligeros") son, respectivamente, director de la divisón tecnológica de control de emisiones de la Oficina para la Protección del Medio Ambiente (EPA), de los Estados Unidos, e investigador de plantilla en el Centro de Estudios sobre Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Princeton. Escribe Gray: "Me licencié en ingeniería química por la Universidad del Mississippi y me doctoré por la de Michigan. Durante los últimos 11 años he trabajado para la Oficina para la Protección del Medio Ambiente, en el sector de la energía y medio ambiente. Me gustan las actividades al aire libre, en particular las excursiones y navegar en canoa por zonas salvajes". Von Hippel se licenció en física por el Instituto de Tecnología de Massachusets, en 1959; recibió el doctorado por la Universidad de Oxford, en 1962. Acaba de ser elegido presidente de la Federación de Científicos Americanos.

PIERRE CHAMBON ("Genes fragmentados") enseña bioquímica en la Facultad de Medicina de la Universidad Louis Pasteur, de Estrasburgo, dirige el laboratorio de genética molecular de eucariotas del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) y está al frente de la unidad 184 de biología molecular e ingeniería genética del Instituto Nacional de la Salud y de Investigación Médica (INSERM). Pertenece al consejo editor del *Journal of Molecular Biology*. Estudió medicina y bioquímica en Estrasburgo, donde se doctoró en 1957. Su investigación se ha centrado en el estudio de la organización y expresión de los genes en las células eucariotas. Hoy le preocupa la regulación de la expresión de los genes durante la embriogénesis.

KEN C. MACDONALD y BRUCE P. LUYENDYK ("La cresta de la dorsal del Pacífico oriental") trabajan en la Universidad de California en Santa Bárbara. Macdonald es profesor de geofísica marina y, Luyendyk, de geología. "Seducido por la oceanografía a donde le llevó su afición por el submarinismo, los viajes y las ciencias naturales de observación", recuerda Macdonald, se graduó en ingeniería por la Universidad de California en Berkeley, doctorándose en oceanografía por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y por el Instituto Oceanográfico Woods Hole. Trabajó en el Instituto Oceanográfico Scripps desde 1975 hasta 1979. Luyendyk se formó en Scripps. Trabajó en Woods Hole desde 1969 hasta 1973; pasó luego a Santa Bárbara, donde "he hecho una transición parcial, empeñándome en el campo de la geología y geofísica continentales". Entre sus proyectos está el estudio "del paleomagnetismo y la tectónica de California meridional y de las propiedades magnéticas de las ofiolitas (rocas de la corteza oceánica que afloran en el continente)".

WALTER H. G. LEWIN ("Las fuentes celestes de brotes de rayos X") enseña física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Nacido en Holanda, estudió en la Universidad de Delft, donde obtuvo su doctorado en 1965. Desde 1966 ha estado en el MIT. "Allí, escribe, emprendí (junto con George W. Clark), en julio de 1966, la primera exploración de la totalidad del cielo a las energías de los rayos X a partir de datos de globos de gran altitud." Desde entonces ha trabajado en investigaciones con satélites que han dado por resultado muchos descubrimientos en astronomía de rayos X. Lewin está también interesado en arte contemporáneo. Ha colaborado desde 1967 con el artista alemán Otto Piene. "Nuestro trabajo culminó en el globo de 500 metros y cinco colores que se lanzó en la ceremonia de clausura de los Juegos Olímpicos de Munich en 1972." A Lewin le queda tiempo todavía para colaborar con el artista holandés Peter Struycken, que crea obras de arte con la ayuda de un ordenador.

KNUT SCHMIDT-NIELSEN ("Sistemas de contracorriente en los animales") detenta la cátedra de fisiología James B. Duke del departamento de zoología de la Universidad Duke. Noruego de origen, se formó en las Universidades de Oslo y de Copenhague, doctorándose por esta última en 1946. Ese mismo año se trasladó a los Estados Unidos para investigar en el Swarthmore College. Inició su vinculación con la Universidad de Duke en 1952.

DANIEL KLEPPNER, MICHAEL G. LITTMAN y MYRON L. ZIMMERMAN ("Atomos altamente excitados") son, repectivamente, profesor de física del Instituto de Tecnología de Massachusetts, profesor asistente del departamento de ingeniería mecánica y aerospacial de la Universidad de Princeton y becario postdoctoral en física del MIT. Kleppner estudió en el Williams College y en la Universidad de Cambridge, recibiéndose de doctor en Harvard. En la facultad de física de este último centro trabajó desde 1960 hasta que se trasladó al MIT, en 1966. "Fui coinventor (con Norman Ramsey) del maser de hidrógeno y ayudé a convertir el instrumento en un reloj atómico útil". Littman se graduó en la Universidad de Brandeis y se doctoró por el MIT, en 1977. Zimmerman se graduó por el Juniata College, en 1974, y se doctoró por el MIT en 1979. Su tiempo libre "lo emplea en la dirección de una pequeña compañía dedicada a iniciar a la gente en las aplicaciones de los ordenadores".

BENJAMIN H. BEARD ("El girasol") es investigador de genética en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, donde trabaja en el cultivo del girasol. Da clases también en la Universidad de California en Davis. Se licenció, en 1950, por la Universidad de Missouri, en Columbia. Continuó sus estudios en la de Nebraska, donde obtuvo el doctorado en 1955. Comenzó ese mismo año a trabajar para el Departamento de Agricultura como investigador agrónomo sobre la mejora de la cebada. Más tarde desarrolló una labor similar para el departamento de genética y mejora del lino. Beard extiende el ámbito de interés a la soja y el cártamo.

MARIANO MOLES VILLAMATE ("Cosmología y observaciones") nace en Binaced (Huesca) el 13 de octubre de 1946. Realiza estudios de ingeniero superior aeronáutico en Madrid. Tras finalizar en 1971, va a París, becado por el Gobierno francés y completa el tercer ciclo en relatividad y teoría de campos en la facultad de ciencias, Jussieu, de París. En junio de 1972 entra en el laboratorio de física teórica, grupo "Gravitación y Cosmologías relativistas" del Instituto Henri Poincaré. Miembro titular del Centre National de la Recherche Scientifique francés desde 1976 y miembro asociado del Institut d'Astrophysique de París desde 1978. En mayo de año siguiente es nombrado codirector del Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto-Almería, función que sigue desempeñando. Trabaja fundamentalmente en astronomía extragaláctica y cosmología observacional.

Hace...

José M.ª López Piñero

...quinientos años

El *Hibbur ha-gadol* (El gran tratado), de Abraham Zacuto, fue traducido al castellano por Juan de Salaya, titular de la cátedra de astrología de la Universidad de Salamanca.

El enlace de la época de los grandes descubrimientos geográficos con la brillante tradición ibérica medieval, en el campo de la observación astronómica, puede personificarse en el judío Abraham Zacuto, autor de una obra de extraordinaria influencia en la transición de los siglos XV a XVI. Nacido en Salamanca en 1452, Zacuto se educó en el ambiente de la aljama de su ciudad natal, todavía floreciente en su juventud, estudiando también seguramente en su universidad. Frente a lo que solían afirmar sus biógrafos, Cantera demostró que no ocupó la cátedra de astrología de la misma, sino que fue asociado a la enseñanza del *quadrivium* por su protector, el obispo de Salamanca Gonzalo de Vivero. Tras la muerte de éste, trabajó durante algún tiempo en Extremadura al servicio de Juan de Zúñiga, el discípulo de Nebrija que era entonces maestre de la Orden de Alcántara. A finales de 1486 o comienzos de 1487 parece que estuvo en relación con Colón, durante la estancia de éste en Salamanca. Al promulgarse en 1492 el decreto de expulsión de los judíos, emigró a Portugal, donde entró al servicio de Juan II y más tarde de Manuel I, influyendo directamente en el viaje de Vasco de Gama. Tras las persecuciones contra los judíos en 1496, emigró al norte de Africa, asentándose en Túnez durante algún tiempo. Murió en Damasco hacia 1515.

Zacuto escribió obras de tipo lexicográfico e histórico y varios textos menores relacionados con la astronomía, entre ellos un *Tratado de las influencias del cielo,* compendio de astrología médica que redactó durante su estancia en Extremadura por encargo de Juan de Zúñiga. Su libro más importante es, sin embargo, el citado *Hibbur ha-gadol,* compuesto en Salamanca a sugerencia del obispo Vivero a partir de 1473. Su discípulo, asimismo judío, José Vecino o Vizinho publicó un breve compendio de su texto acompañado de las efemérides del Sol, la Luna y los planetas. Dicho resumen, al que se debió la influencia de Zacuto en Europa, fue impreso por vez primera el año 1496 en la localidad portuguesa de Leiria con el título de *Almanach perpetuum.* Aparecieron al mismo tiempo dos ediciones, una de ellas con los cánones en latín y otra en castellano, siendo las tablas idénticas en ambas. Más tarde fue reimpreso en varias ocasiones, siendo una de sus ediciones corregida y anotada por Alfonso de Córdoba. Por otra parte, la influencia de la obra de Zacuto sobre la cátedra de astrología de Salamanca fue muy grande durante los decenios en los que fue el principal foco académico de la cosmografía peninsular.

El *Almanach,* con todas las tablas astronómicas de la época, aparte de su contribución a la ciencia de los astros, permitía aplicaciones de tipo astrológico y también cronológico. No obstante, su relieve histórico se debe al importante papel que desempeñó en la introducción de las observaciones astronómicas en el arte de navegar.

Desde la Antigüedad se sabía que la altura del polo celeste sobre el horizonte equivalía a la latitud del lugar. Para medir dicha altura, había que recurrir a las estrellas cercanas al polo, es decir, a la polar en el hemisferio norte y a la Cruz del Sur –cuando fue conocida– en el hemisferio austral. Sin embargo, ambas solamente podían observarse de noche y, además, en las aguas tropicales solían estar ocultas por las brumas. Esta es la razón de la decisiva importancia práctica que adquirió la obtención de la latitud mediante la medición de la altura meridiana del Sol. No obstante, para utilizar dicho método resultaba necesario disponer de tablas de declinación solar. Por otro lado, las observaciones exigían instrumentos adecuados, si se deseaba descartar determinaciones inútiles por demasiado burdas.

La solución inicial de estos problemas, y por lo tanto el punto de partida de la navegación apoyada en la observación astronómica, se produjo en unas circunstancias que han sido bien aclaradas por la investigación histórica. Subrayemos a este respecto la importancia de los trabajos de Millás Vallicrosa, Vernet, Guillén Tato, Laguarda Trías, Bensaúde, Teixeira de Mota, Cortesão y Beaujouan.

La astronomía práctica que sirvió de base procedía de la tradición que la observación de los astros había tenido en la Península Ibérica a lo largo de toda la Edad Media. El escenario original de su aplicación al arte de navegar fue la actividad desarrollada en Portugal en torno a Juan II, a partir de 1480.

La colaboración de Abraham Zacuto permitió que las tablas de declinación solar incluidas en su *Almanach* fueran utilizadas por su discípulo José Vecino o Vizinho para redactar *Regimen-*

Portada y tablas del Almanach perpetuum *de Abraham Zacuto, edición de Leiria (1496) con los cánones en latín. Esta obra del judío salmantino fue de importancia central para el desarrollo, en Portugal y España, de un "arte de navegar" basado en la astronomía. Las tablas recogen las posiciones del Sol en la eclíptica, referidas al mediodía de cada uno de los días del año, en grados, minutos y segundos de cada signo del Zodiaco, calculadas para los años 1473 a 1476. "Si quieres saber el verdadero lugar del Sol para cada día –dice en la explicación de estas tablas el propio Zacuto– aquí lo hallarás ordenado por cuatro años, que son el número de su revolución. El comienzo de ellos está en el mes de marzo de 1473, según la cronología de los cristianos. A la cabeza de cada año hállase escrito el número de los cuatro años, y está ordenado de mediodía a mediodía, conforme lo está todo el resto de los planetas en este meridiano, que dista del Occidente 25 grados y 46 minutos y que está alejado de Jerusalem, la ciudad santa, del lado de Occidente dos horas y dos tercios de hora y un octavo de hora aproximadamente, según la opinión de Poel; mas, conforme a la verdad, es tres horas y 53 minutos. Y mi voluntad con respecto al mediodía es el mediodía igual y no el mediodía visible. Más adelante se declarará cómo has de saber el (medio) día visible. Y si el horizonte en que estuvieren fuera diverso en longitud a este horizonte, sabrás su diversidad tomando por cada grado cuatro minutos de 60 en la hora, y por cada 15 minutos de grado un minuto de hora. Y si fuere oriental a este horizonte, lo cual ocurrirá cuando fuere tu horizonte de más grados que la longitud de este horizonte, añadirás la cantidad (suma) de la diversidad sobre las horas del mediodía de estas tablas. Si fuere occidental, lo cual ocurrirá cuando la longitud de tu horizonte fuere menor que la longitud de este horizonte, he aquí que entonces menguarás la dicha diversidad."*

Tabule Zacuti:

Tabule tabularum celestium motuum astronomi zacuti nec non stelarum fixarum longitudines ac latitudines ad motus veritatem mira diligētia reducte ac in principio canones ordinatissime incipiūt felici sidere



De dignitates planetarum in signis no tande sunt per maxime in iudiciis

signi	saturnus	iovis	mars	sol	venus	mer	luna	caput	cauda
♈	5	5	8	8	3	2	0		
♉	3	2	5	0	10	3	8		
♊	5	6	3	1	2	10	0	4	
♋	2	6	5	0	6	3	9		
♌	6	6	3	8	2	2	0		
♍	2	2	5	1	6	12	3		
♎	10	6	2	0	6	5	1		
♏	2	2	11	1	6	2	3		
♐	6	10	2	3	2	3	1		4
♑	7	3	10	1	5	2	3		
♒	10	5	2	0	3	6	1		
♓	3	8	6	0	9	2	3		

characteres signorum zodiaci

♈	Aries		♎	libra
♉	Taurus		♏	Scorpius
♊	gemini		♐	Sagictarius
♋	Cancer		♑	Capricornus
♌	leo		♒	Aquarius
♍	Virgo		♓	pisces

Tabula prima solis cuius radix ē anno 1473

dies mensium	martius pisces g	m	2	aprilis aries g	m	2	maius taurus g	m	2	iunius gemini g	m	2	iulius cancer g	m	2	augustus leo g	m	2
1	20	26	30	20	54	0	19	51	7	19	25	4	17	55	52	17	32	38
2	21	25	59	21	52	24	20	48	36	20	22	5	18	52	55	18	30	17
3	22	25	28	22	50	48	21	46	5	21	19	7	19	49	58	19	27	56
4	23	24	56	23	49	8	22	43	34	22	16	8	20	47	2	20	25	36
5	24	24	21	24	47	28	23	41	2	23	13	9	21	44	6	21	23	18
6	25	23	46	25	45	48	24	38	30	24	10	11	22	41	12	22	21	0
7	26	23	11	26	44	0	25	35	54	25	7	12	23	38	19	23	18	42
8	27	22	26	27	42	11	26	33	17	26	4	13	24	35	26	24	16	32
9	28	21	41	28	40	22	27	30	40	27	1	15	25	32	37	25	14	22
10	29	20	55	29	38	26	28	28	0	27	58	17	26	29	48	26	12	12
11	♈0	20	3	♉0	36	30	29	25	19	28	55	19	27	27	0	27	10	4
12	1	19	11	1	34	35	♊0	22	33	29	52	20	28	24	13	28	7	57
13	2	18	19	2	32	32	1	19	54	♋0	49	21	29	21	26	29	5	50
14	3	17	18	3	30	29	2	17	10	1	46	22	♌0	18	40	♍0	3	53
15	4	16	16	4	28	25	3	14	25	2	43	23	1	15	59	1	1	56
16	5	15	14	5	26	16	4	11	37	3	40	24	2	13	19	2	0	0
17	6	14	7	6	24	7	5	8	49	4	37	25	3	10	37	2	58	5
18	7	13	0	7	21	58	6	6	0	5	34	26	4	7	58	3	56	11
19	8	11	53	8	19	44	7	3	9	6	31	28	5	5	10	4	54	17
20	9	10	40	9	17	29	8	0	18	7	28	30	6	2	40	5	52	36
21	10	9	25	10	15	14	8	57	27	8	25	31	7	0	0	6	50	54
22	11	8	10	11	12	54	9	54	32	9	22	32	7	57	33	7	49	14
23	12	6	52	12	10	34	10	51	36	10	19	34	8	55	0	8	47	36
24	13	5	34	13	8	14	11	48	40	11	16	35	9	52	28	9	45	58
25	14	4	16	14	5	51	12	45	44	12	13	37	10	49	57	10	43	20
26	15	2	51	15	3	27	13	42	48	13	10	30	11	47	26	11	42	40
27	16	1	26	16	1	3	14	39	51	14	7	41	12	44	57	12	41	13
28	17	0	1	16	58	35	15	36	54	15	4	43	13	42	28	13	39	48
29	17	58	32	17	56	6	16	33	57	16	1	46	14	40	0	14	38	20
30	18	57	3	18	53	37	17	31	0	16	58	49	15	37	32	15	36	52
31	19	55	34	0	0	0	18	28	2	0	0	0	16	35	5	16	35	24

3

martius — **aprilis**

Tabula ascēdētis et duodecim domorum

dies mensium	hore	minuta	1 / 7 cācer g	2 / 8 leo g	3 / 9 leo g	4 / 10 virg g	5 / 11 scor g	6 / 12 sagi g	dies mensium	hore	minuta	1 / 7 leo g	2 / 8 leo g	3 / 6 virg g	4 / 10 libr g	5 / 11 scor g	6 / 12 capr g
1	0	0	12	3	26	20	0	7	1	1	53	5	29	25	21	28	1
2	0	4	13	4	27	21	1	8	2	1	56	5	30	26	22	29	2
3	0	8	13	5	28	22	2	9	3	2	0	6	♍1	27	23	30	3
4	0	11	14	6	29	23	3	10	4	2	4	7	2	28	24	30	4
5	0	15	15	7	30	24	4	11	5	2	7	8	3	29	25	♐1	5
6	0	19	16	8	♍1	25	5	12	6	2	11	9	3	30	26	2	5
7	0	22	17	8	2	26	6	12	7	2	15	9	4	♎1	27	3	6
8	0	26	17	9	3	27	7	13	8	2	18	10	5	2	28	4	6
9	0	30	18	10	4	28	8	14	9	2	22	11	6	3	29	4	7
10	0	33	19	11	4	29	9	14	10	2	25	12	7	4	30	5	8
11	0	37	19	12	5	30	9	15	11	2	29	12	8	5	♏1	6	9
12	0	41	20	12	6	♎1	10	16	12	2	33	13	9	5	2	7	9
13	0	44	21	13	7	2	11	17	13	2	37	14	9	6	3	8	10
14	0	48	22	14	8	3	12	18	14	2	41	14	10	7	4	9	11
15	0	52	22	15	9	4	13	18	15	2	44	15	10	7	4	9	11
16	0	55	23	16	10	5	14	19	16	2	48	15	11	8	5	10	12
17	0	59	24	17	11	6	15	20	17	2	52	16	12	9	6	10	12
18	1	2	25	18	12	7	16	21	18	2	56	17	13	10	7	11	13
19	1	6	25	18	13	8	17	21	19	3	0	17	14	11	8	12	14
20	1	10	26	19	13	9	17	22	20	3	3	18	15	12	9	13	15
21	1	13	27	20	14	10	18	23	21	3	7	19	16	13	10	14	15
22	1	17	28	21	15	11	19	24	22	3	11	20	16	14	11	15	16
23	1	20	28	22	16	12	20	24	23	3	15	20	17	15	12	15	17
24	1	24	29	22	17	13	21	25	24	3	19	21	18	16	13	16	18
25	1	28	30	23	18	14	22	26	25	3	23	22	19	17	14	17	18
26	1	31	30	24	19	15	23	27	26	3	26	23	20	18	15	18	19
27	1	35	♌1	25	20	16	23	27	27	3	30	23	21	19	16	18	20
28	1	38	2	25	21	17	24	28	28	3	34	24	22	20	17	19	21
29	1	42	3	26	22	18	25	29	29	3	38	25	23	21	18	20	22
30	1	46	3	27	23	19	26	29	30	3	41	26	24	22	19	21	23
31	1	49	4	28	24	20	27	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0

tos, manuales prácticos que utilizaron los marinos portugueses para calcular sistemáticamente las latitudes en la costa africana, mediante la altura del Sol. Para las observaciones se adaptaron los instrumentos empleados por la astronomía práctica medieval: cuadrantes, ballestillas y versiones muy simplificadas de los astrolabios.

Ha quedado desmentida la importancia que algunos historiadores alemanes habían concedido a su compatriota Martin Behaim, probable discípulo de Regiomontano presente en este ambiente portugués. Baste decir que las tablas de los *Regimentos* están en desacuerdo con las de Regiomontano y corresponden perfectamente a las de Zacuto. Behaim no fue quien proporcionó a los portugueses los conocimientos astronómicos para calcular la latitud, como con un típico apriorismo nacionalista pretendían esos autores alemanes, pero sí fue un diestro cartógrafo y un buen astrónomo práctico.

La organización que cristalizó en el reinado de Juan II había sido preparada seis decenios antes en el centro de estudios montado por el infante don Enrique el Navegante en el promontorio de Sagres. Pero, como dice Guy Beaujouan, la fama casi mítica de esta figura "no debe quitar a Juan II de Portugal el inmenso mérito de haber sabido –antes que ningún otro Estado– organizar la explotación técnica de los conocimientos teóricos de su época". Recordemos que un personaje central de la escuela de Sagres fue el cartógrafo y *buxoler* (fabricante de brújulas) Jacome Ribas de Mallorca. Se llamaba antes de su conversión Jafuda Cresques y era hijo del cartógrafo mallorquín Abraham Cresques, autor del célebre *Mappae Mundi* de 1375. Los portugueses, en efecto, acertaron a integrar las principales tradiciones ibéricas relacionadas con la navegación.

La importante participación española en el desarrollo del arte de navegar fue, naturalmente, consecuencia del descubrimiento de América. Colón utilizó en sus viajes el nuevo tipo de barco, dominaba las prácticas habituales tanto entre los marinos del Mediterráneo como entre los del Atlántico y tenía noticias de las recientes técnicas de carácter astronómico. Utilizó el astrolabio náutico, aunque sin fruto, debido a su insuficiente conocimiento del mapa celeste en las latitudes bajas, y predijo en Jamaica un eclipse de Luna. Empleó la traducción castellana del *Almanach* de Zacuto, ya que se conserva un ejemplar con notas suyas.

La gran institución que centralizó la actividad náutica fue la Casa de Contratación de Sevilla. Recordemos, como hito inicial, la creación en 1508 del cargo de piloto mayor, para "examinar y graduar los pilotos y censurar las cartas e instrumentos necesarios para la navegación". Y como principales acontecimientos posteriores la constitución de un padrón real o arquetipo cartográfico continuamente renovado (1512), la fundación del puesto de cosmógrafo mayor (1523) y la de la cátedra de navegación y cosmografía (1552).

En relación directa o indirecta con la Casa de Contratación se escribió la mayor parte de los textos consagrados al arte de navegar, sin duda una de las principales aportaciones españolas a la literatura científica de la época.

Los portugueses habían editado los *Regimentos* antes aludidos, de los que se conservan los llamados de Munich (ca. 1509) y de Evora (ca. 1517), por las bibliotecas que poseen los únicos ejemplares conocidos. Posteriormente, su contribución más importante fue la debida al gran matemático Pero Nunes, que publicó un *Tratado de sphera* (1537) en portugués con una exposición sobre "as principaes dubdas de navegaçao" y, sobre todo, la gran obra en latín titulada *De arte atque ratione navegandi* (1546).

El primer texto de náutica impreso en España fue la *Suma de geographia que (...) trata largamente del arte del marear* (1519), del sevillano Martín Fernández de Enciso. En 1535 se publicó, también en Sevilla, el *Tratado del Esphera y del arte del marear,* de Francisco Falero. En la década central del siglo, el *Arte de navegar* (1545) de Pedro de Medina y el *Breve compendio de la sphera y de la arte de navegar* (1551), de Martín Cortés, iniciaron una época radicalmente distinta en la historia de la literatura náutica, superando el novel de "recetario" práctico o de manual escolar propio de los textos anteriores. Tanto por la altura científica de su contenido, como por su estructura y extensión, son auténticos tratados sistemáticos del arte de navegar. Influyeron de modo decisivo en las publicaciones posteriores sobre la materia, tanto españolas como del resto de Europa. Para dar idea de la difusión internacional de ambos tratados anotaremos solamente que el de Medina alcanzó quince ediciones en francés entre 1554 y 1633, cinco en holandés desde 1580 a 1598, tres en italiano y dos en inglés, mientras que el de Cortés tuvo diez ediciones en inglés entre 1561 y 1630.

Ahorro de combustible en vehículos ligeros

Al disminuir la producción de crudo, crece el interés por los vehículos con menor consumo de combustible. Hacia 1995, un coche podría recorrer 100 kilómetros con cuatro litros de gasolina

Charles L. Gray, Jr., y Frank von Hippel

Los Estados Unidos están saliendo de una era en la que el crecimiento económico venía estimulado por una abundancia de petróleo barato para entrar en un período difícil en el que la energía, en particular en forma de combustible líquido, será mucho más cara y limitada en su oferta de suministro. Que será un período peligroso, resulta obvio si atendemos a los temores expresados en medios oficiales de que la nación no disponga de un acceso continuo a los mayores depósitos subterráneos de petróleo conocidos, los de la región del golfo Pérsico. Se pide que los consumidores no despilfarren energía, al tiempo que gobierno e industria centran sus esfuerzos en el desarrollo de nuevas fuentes propias, por ahora muy costosas. Sin negar la conveniencia de tales medidas, creemos que el éxito de la viabilidad de la transición económica a la era postpetrolífera depende de una decisión mucho más resuelta por parte de ambos, gobierno e industria, de aumentar el rendimiento en el uso de la energía en aquellos sectores de la economía que se basan en los combustibles líquidos. Y ello, empezando por el consumidor más voraz: el automóvil.

El automóvil le ha dado al ciudadano un margen extraordinario de movilidad personal. Sólo en los Estados Unidos, existen cerca de 100 millones de vehículos de pasajeros y 30 millones de camiones ligeros (en su mayoría furgonetas de propiedad privada); lo que viene a representar un vehículo por cada adulto. En 1980, este inmenso parque automovilístico consumió cerca de seis millones de barriles de productos petrolíferos por día, el equivalente aproximado de todas las importaciones norteamericanas, casi el 60 por ciento de la producción nacional.

Años atrás, no muchos, estas cifras apenas hubieran despertado interés. En 1972, antes del embargo del crudo árabe, no se conocían las restricciones de gasolina, y el coste total de las importaciones estadounidenses de crudo fue sólo de 5000 millones de dólares. En 1980, el coste de la importación de no mucho más petróleo se había elevado hasta los 80.000 millones de dólares, lo que suponía unos 1000 dólares por familia. Ante la subida vertiginosa de los precios, que no se detienen, y la incertidumbre en torno a la disponibilidad de petróleo, algunos han empezado a preguntarse si los norteamericanos pueden continuar disfrutando del lujo del automóvil.

Mientras unos opinan que los Estados Unidos sufren de un exceso de vehículos privados, otros sostienen que el automóvil desempeña un papel insustituible en la vida norteamericana. Temen éstos que la industria automovilística, hostigada por una fuerte competencia extranjera, acabe muy pronto por fabricar un número insuficiente de unidades para garantizar una economía interior sana. Entre quienes defendieron con especial viveza este punto de vista destaca Neil Goldschmidt, Ministro de Transportes en el gabinete Carter, en un informe que remitió al ex-presidente. La producción de automóviles y camiones, con sus redes de servicios auxiliares, constituye el 8,5 por ciento del producto nacional bruto, más del 12 por ciento de los gastos corrientes personales y cerca del 25 por ciento de las ventas al por menor en los Estados Unidos.

Este sector de la economía atraviesa periódicas dificultades, ya que en 1979 hubo un cambio rápido de las preferencias del consumidor hacia vehículos más pequeños y de menor consumo. En 1980, la industria del automóvil perdió más de 4000 millones de dólares y las firmas extranjeras se apoderaron de más del 25 por ciento del mercado. A final de año, según el informe de Goldschmidt, 190.000 trabajadores de fábrica, la cuarta parte del sector, estaban en paro, y entre 350.000 y 650.000 trabajadores en industrias subsidiarias habían perdido su puesto de trabajo. Si se quiere que la industria compita con éxito en el futuro, establece el informe, "las empresas norteamericanas deberán acometer una ronda, si no varias, de grandes inversiones de capital para reequipar sus medios de producción, incluyendo el rediseño del propio automóvil", al objeto de reducir el consumo de combustible. El informe pone en duda la capacidad financiera de la industria automovilística "para sostener en la última parte de la década un programa de inversiones cuya magnitud se aproximará a la de la industria actual".

Nuestro propio análisis nos anima a concluir que, si esta limitación financiera puede superarse, con la tecnología hoy disponible podría reducirse el consumo medio de todos los vehículos nacionales fabricados en 1995, rebajándolo hasta 4 litros por cada 100 kilómetros. Una tecnología más avanzada permitiría llegar a los 2,6 litros por cada 100 kilómetros.

Para situar estos objetivos en su debida perspectiva, repasemos brevemente la historia reciente del consumo de combustible. En 1974, el vehículo medio vendido en los Estados Unidos conseguía un consumo ligeramente inferior a 18,1 litros de gasolina por cada 100 kilómetros. En 1980 se ha alcanzado un valor estimado de 12,4 litros por cada 100 kilómetros. Por ley del Congreso, la flota de automóviles que se fabrique para los modelos del año 1985 debe lograr la media de 8,6 litros por cada 100 kilómetros, medida en banco dinamométrico, según las pruebas realizadas por la Oficina de Protección del Medio Ambiente (EPA). Este valor fijado por

el Congreso representa aproximadamente la mitad del consumo de los modelos de 1974 (determinado por el mismo método). El Ministerio de Transportes recibió también instrucciones para fijar los estándares de consumo de los camiones ligeros al "mínimo valor realizable". Recientemente, el ministerio determinó que, a la vista de los problemas financieros de la industria, no se podía fijar el nivel por debajo de los 11 litros por cada 100 kilómetros en 1985.

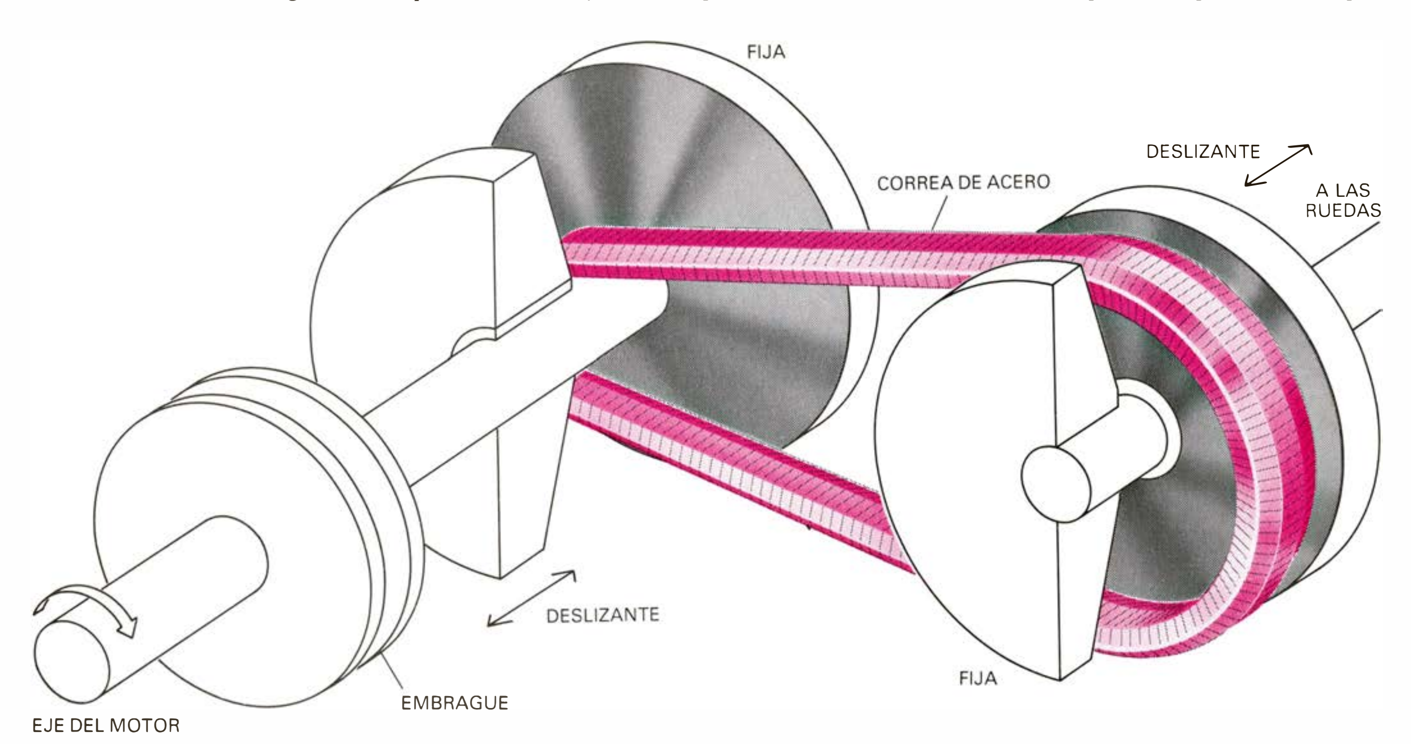
Mas, como resultado de la nueva demanda de ahorro de combustible del consumidor, parece que los fabricantes podrán superar los estándares de automóviles de turismo de 1985 con un margen significativo. La General Motors Corporation ha anunciado que espera que sus modelos de 1985 tengan un consumo medio de 7,6 litros por cada 100 kilómetros, medido por el procedimiento de pruebas de la EPA. Se espera, de todos modos, que los consumos en carretera sean significativamente superiores debido a los defectos del método de pruebas, que fue "congelado" por ley de 1975. El Ministerio de Energía estima que, en 1985, el consumo medio en carretera de los nuevos vehículos ligeros (incluyendo los importados) será de 9,4 litros por cada 100 kilómetros para automóviles de turismo, 13,1 litros por cada 100 kilómetros para los camiones ligeros y 10,2 litros por cada 100 kilómetros de media global.

El Ministerio de Energía calcula que, aun suponiendo que se alcancen esos rendimientos medios, los Estados Unidos seguirán consumiendo combustible de automoción en 1985 a un ritmo de 5,5 millones de barriles por día, tan sólo medio millón diario por debajo del gasto actual. La persistencia de este alto nivel de consumo se debe, en parte, a que se prevé un aumento del 10 por ciento en el número de vehículos ligeros gobernados por nuevos conductores cuyo número crece todavía. Y debido, sobre todo, a los vehículos más viejos que seguirán en activo ese año, se alzará la media de los consumos del parque móvil a 13,1 litros por cada 100 kilómetros.

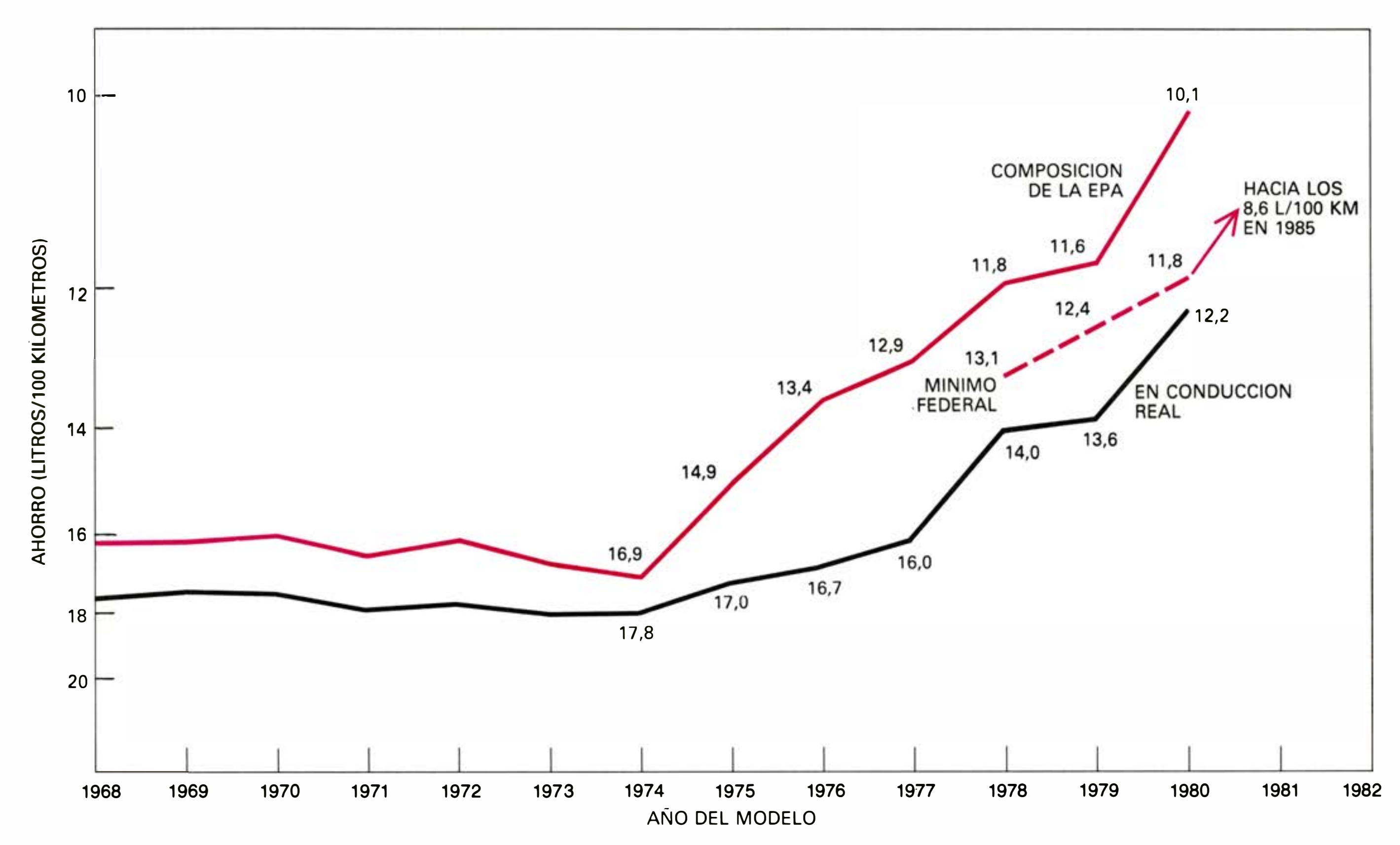
En lo referente a compañías explotadoras, Exxon Corporation estima que, en 1985, la producción estadounidense de petróleo bajará en un 20 por ciento, esto es, dos millones de barriles diarios. Si se cumplen ambas previsiones, los automóviles consumirán toda la producción nacional menos 2,5 millones de barriles por día, dejando pues muy poco a los demás sectores de la economía, que en 1980 necesitaron más de 10 millones de barriles de crudo diarios. Por consiguiente, a pesar de las grandes reducciones previsibles en el consumo de petróleo de estos otros sectores, los Estados Unidos precisarán importar todavía una cantidad sustancial de crudo en 1985.

Para nosotros, una de las vías más eficaces y baratas para reducir la dependencia estadounidense del petróleo extranjero a partir de 1990 consiste en elevar el problema al rango de asunto de estado: replantearse el diseño del vehículo al objeto de obtener un mejor rendimiento energético y conceder ayuda financiera a la industria nacional para alcanzar dicha meta. Estimamos que, para el año 2000, podría reducirse el consumo de combustible del parque de vehículos ligeros en dos tercios, dejándolo en torno a los dos millones de barriles diarios. El petróleo ahorrado, "producido", por decirlo así, por la industria, tendría un coste mucho menor que una cantidad equivalente de petróleo producido sintéticamente a partir de carbón o pizarra. La agresión al medio ambiente sería también mucho menor.

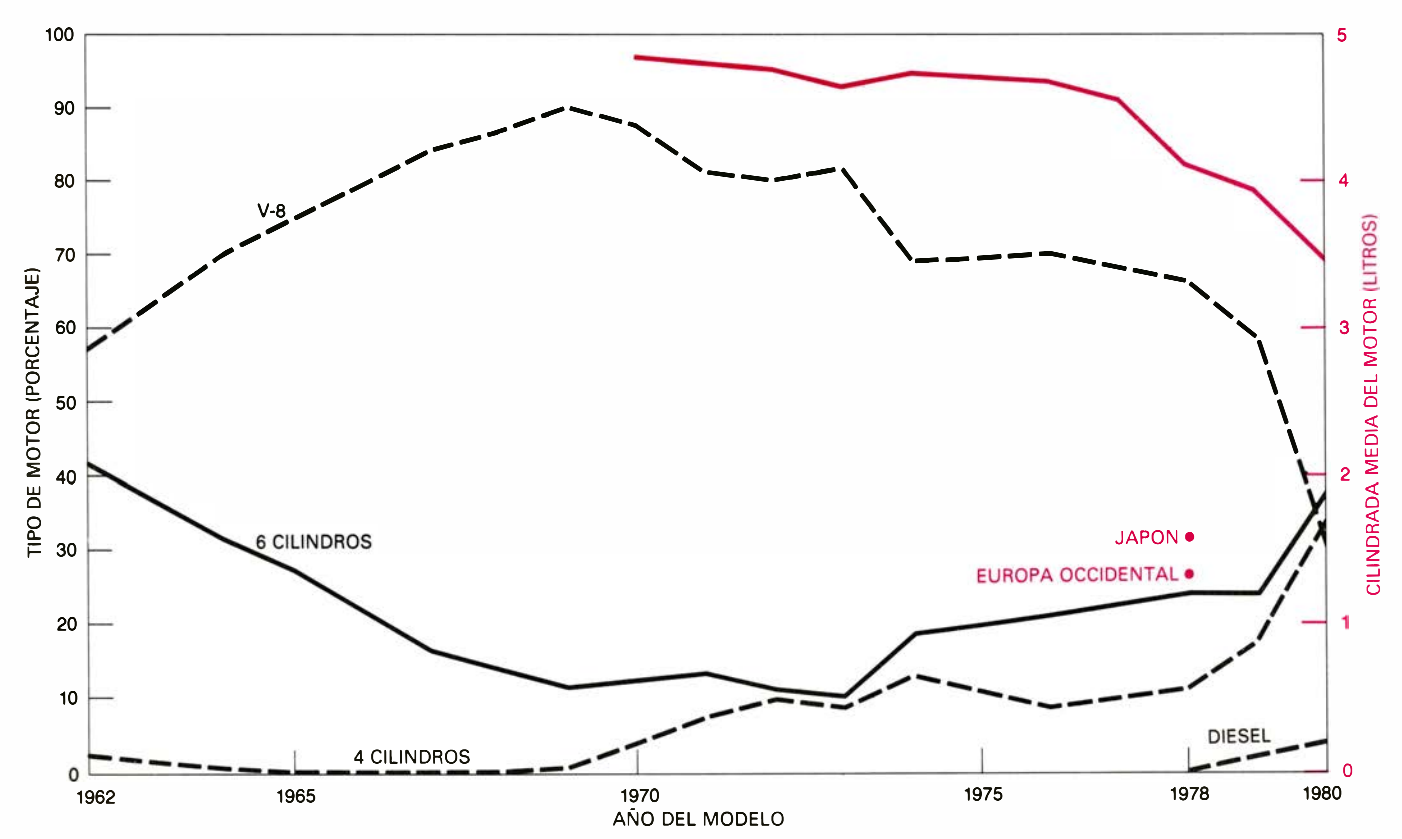
Rebajar el consumo medio de los 4 litros por cada 100 kilómetros puede parecer un sueño. Pero no lo es. El enorme potencial de la tecnología automovilística para mejorar los rendimientos nace de la posibilidad de combinar las innovaciones en las características físicas medias del automóvil y en el rendimiento de su motor y transmisión (mecanismo que canaliza la energía del motor a las ruedas). Dichos cambios se están hoy introduciendo sin orden ni concierto, a medida que los fabricantes toman nota de las nuevas exigencias de la demanda. Mancomunados, esos cambios y ensayos, hoy aislados, habrán de adquirir una potencia apreciable. Nos ocuparemos, pues, de un hipo-



TRANSMISION DE RELACION continuamente variable. Supondrá un ahorro de combustible al permitir que el motor funcione en régimen de máximo rendimiento para una potencia de salida dada. Se representa una transmisión variable de la Borg-Warner Corporation. Una correa de acero en V enlaza dos poleas cuyas velocidades pueden cambiarse de modo continuo modificando el radio eficaz de las poleas. Un cono que se desliza hacia la correa en el eje de una polea comprime la correa hasta un radio mayor; un cono en el eje de la otra polea permite, a su vez, que la correa se deslice hacia un radio menor.



AHORRO DE COMBUSTIBLE de los nuevos turismos vendidos en los Estados Unidos. Ha aumentado en respuesta a las exigencias del mercado y en cumplimiento de las normas de contaminación, federales, que entraron en vigor con los modelos de 1978. Las normas de contaminación federales se fundan en pruebas realizadas en bancos dinamométricos de la Oficina de Protección del Medio Ambiente (EPA) que simulan ciclos de conducción específicos para ciudad y autopistas, de los que se deriva un ahorro mixto de combustible de un 55 por ciento de ciudad y un 45 por ciento de autopista. Cuando se desarrolló la normativa EPA, la combinación de ambos daba un ahorro ligeramente inferior que el ahorro medio en conducción real. Desde entonces, la diferencia ha aumentado. El valor superior del ahorro de los dos que se dan en los anuncios de automóviles es el ahorro urbano estimado por la EPA que se aproxima al registrado en conducción real. El consumo mixto ciudad-autopista no deberá rebasar los 8,6 litros cada 100 km en 1985.



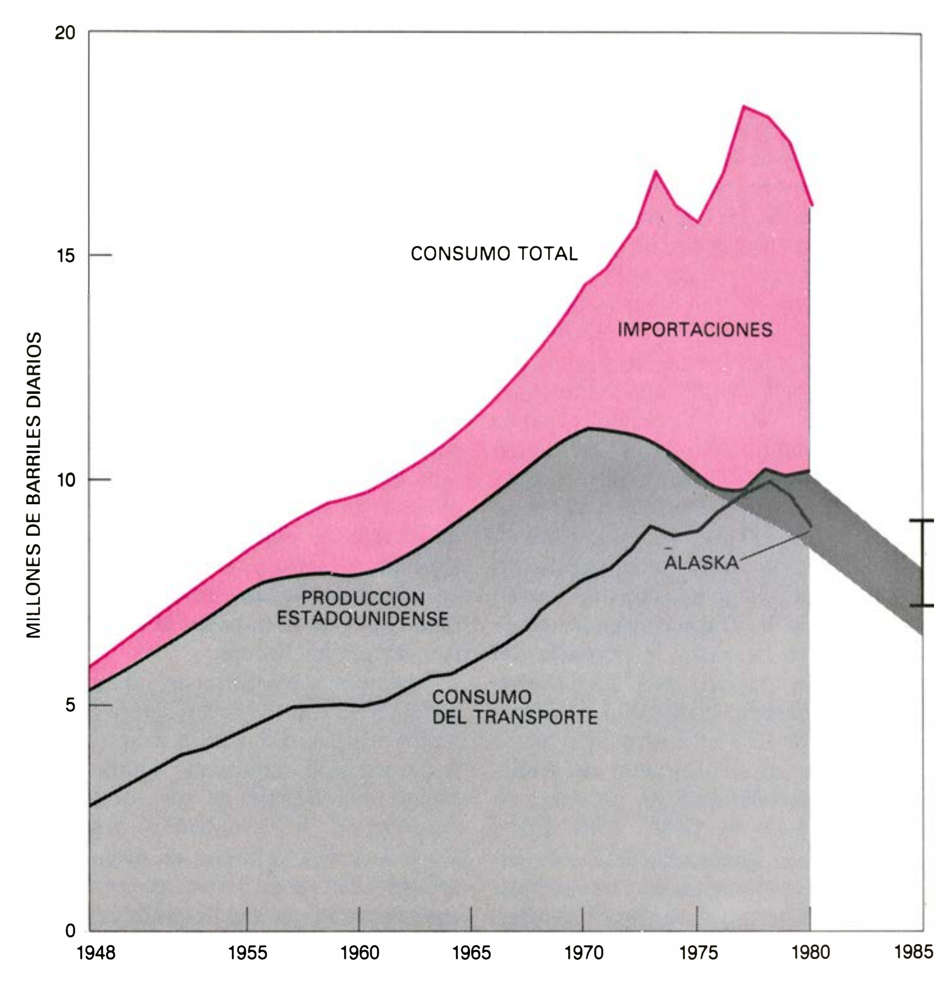
DECLIVE del motor de ocho cilindros en V, que se inició con el embargo del crudo a finales de 1973, cuando el 80 por ciento de los coches norteamericanos de reciente fabricación estaban dotados de motores de ocho cilindros. El descenso más brusco se produjo en los modelos del año 1980, en los que el 70 por ciento de los coches norteamericanos venían equipados con motores más pequeños o diesel. En los modelos de 1980 el tamaño medio del motor (*en color*) de los nuevos turismos se redujo en un tercio, aunque, a pesar de todo, dobló el tamaño medio de los motores de los coches fabricados en 1978 en Europa Occidental y Japón. En 1985 el motor de 8 cilindros en V habrá desaparecido del mercado. Para entonces habrá coches con menos de cuatro cilindros.

tético parque de vehículos ligeros, cuyo nuevo diseño debe resultar en un consumo mucho menor.

En vez de la flota actual, en la que dos tercios de las unidades están proyectadas para transportar cinco o seis pasajeros, propondríamos que más de la mitad del parque fuese de cuatro plazas, e incluiríamos una fracción significativa de vehículos de dos plazas. La potencia necesaria en las ruedas motrices sería menos de la mitad que la de los vehículos actuales, gracias a la reducción de peso, resistencia aerodinámica y resistencia a la rodadura de los neumáticos. Los automóviles irían propulsados por versiones, apreciablemente más eficientes, del actual motor de combustión interna, con la transmisión y las potencias máximas de los motores optimizados para reducir el consumo. La tecnología necesaria para tan parco consumo existe ya en las plantas de montaje o en prototipos casi comerciales. Los vehículos que proponemos, estamos seguros de ello, no sólo ahorrarán combustible, sino que también serán fiables y respetarán los límites de contaminación atmosférica. Y no está claro que su mantenimiento tenga que ser más caro que el de los modelos actuales.

El vehículo de turismo norteamericano se desarrolló en un tiempo de combustible barato, cuando las familias arquetípicas constaban de cuatro o seis miembros y pocos hogares podían mantener más de un coche. El vehículo estándar de seis plazas se destinaba a usos privados y comerciales. De modo similar, los camiones ligeros surgieron con una finalidad laboral. Pero hoy los hogares tienen una media de menos de tres personas, y la mayoría de las familias poseen al menos dos coches o un coche y un camión ligero. Bastante más de la mitad de los camiones ligeros (vehículos con un peso bruto, cuando están completamente cargados, inferior a 4500 kilogramos) se destinan a usos privados, sobre todo, para el transporte de pasajeros. Es inmediato que el parque automovilístico estadounidense dispone de una gran capacidad de transporte que no se aprovecha, salvo en contadas ocasiones.

Hubo que esperar a la subida del precio de la gasolina, en 1979, para que el público pensara en el ahorro sustancial de combustible que podía obtener cambiando a una flota mejor adaptada a las necesidades modernas. Las ventas de coches de cinco o seis plazas y de los camiones ligeros de mayor tara cayeron en picado. En la primera mitad de 1980 los coches de cuatro plazas se hicieron con el 45 por ciento del mercado de turismos, en comparación con el 33 por ciento de 1978. A pesar de todo, tampoco este cambio equilibra la capacidad de los vehículos con las exigencias del transporte. Las encuestas revelan que, en el 80 por ciento de los viajes, los automóviles no llevan más de dos personas y, en algo más de la mitad de los viajes, va sólo el conductor. Parece pues verosímil que si en esta década existieran coches baratos de dos plazas, se venderían muchos. (Los únicos vehículos de este tipo que se pueden adquirir hoy son los deportivos, bastante caros y de bajo rendimiento energético.)



DESCENSO DEL CONSUMO DE CRUDO en los Estados Unidos en los tres últimos años. El transporte sigue representando algo más de la mitad del total. El ochenta por ciento del combustible para transporte lo han consumido los coches de todos los tipos; el 80 por ciento de esta última fracción corrió a cargo de los 130 millones de automóviles y camiones ligeros que sirven de turismos. El año pasado, esos 130 millones de vehículos particulares gastaron seis millones de barriles diarios. La cantidad media de crudos importada en 1980 se acercó a los 6,5 millones de barriles diarios con un coste anual próximo a los 80.000 millones de dólares. La producción nacional fue de 10,2 millones de barriles diarios en 1980, 15 por ciento del cual procedía de Alaska. El segmento vertical sobre 1985 señala el volumen previsto de producción nacional.

Sabemos lo escurridizo que es predecir la evolución del mercado cuando entran en juego factores sociales complejos. Pero si partimos de previsibles restricciones periódicas de gasolina y de una subida constante de su precio a lo largo de los próximos diez años, cabe presumir que la venta de turismos en la segunda mitad de los ochenta se distribuirá, más o menos, así: dos plazas, 25 por ciento; cuatro plazas, 50 por ciento; cinco o seis plazas, 25 por ciento. La demanda de camiones ligeros descenderá, además, hasta el nivel de sólo un camión por cada seis coches vendidos, frente al uno por cada cuatro, que es la proporción en que se halla hoy. Y si la industria automovilística norteamericana estuviese preparada para tal cambio, se beneficiaría: las familias concientes del problema del combustible se decidirían por poseer un mayor número de vehículos, cada uno con un diseño funcional distinto. La familia que hoy tuviera dos automóviles optaría por tres, si fuesen más eficientes que los actuales: dos biplazas para ir al trabajo y pequeños desplazamientos locales y un tercer coche de cuatro, cinco o seis plazas para los viajes en familia. El rápido aumento de unidades familiares con tres vehículos hasta cerca del 20 por ciento de las mismas, a lo largo de la década de los setenta, se debió, en parte, a la popularidad de los coches pequeños.

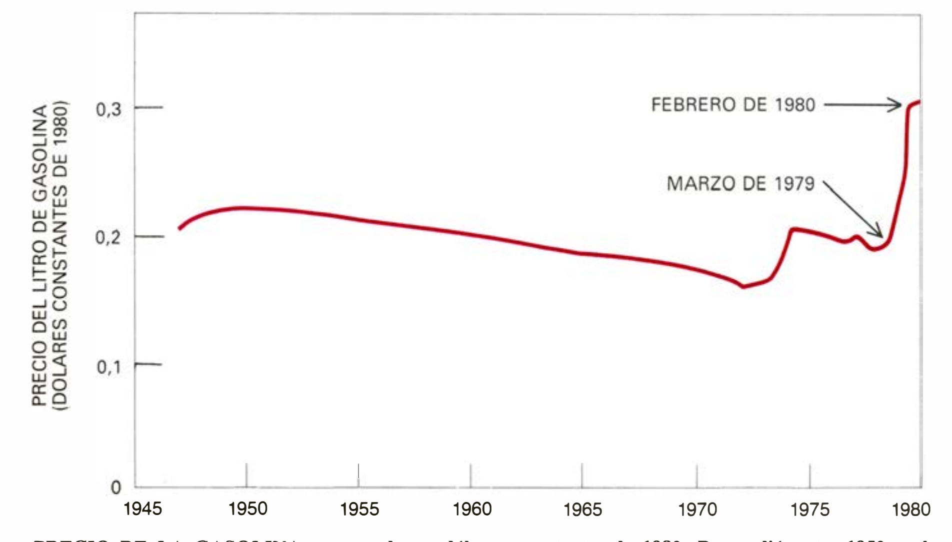
La vía que conduce al ahorro de consumo combina varios factores relacionados y mutuamente implicados: reducción del peso, de la resistencia aerodinámica y de la resistencia a la rodadura y motores y transmisiones que rindan más. Se ha registrado ya un aligeramiento substancial de peso de los automóviles, así como una reducción en su tamaño medio y en la potencia del motor, sin que ello comporte una pérdida significativa de su espacio útil interior. Por ejemplo, uno de los nuevos coches "K" de Chrysler, el cinco plazas Plymouth Reliant de 1981, pesa 480 kilogramos (30 por ciento) menos que el Plymouth Volaré de 1980, sacrificando sólo 120 decímetros cúbicos (4 por ciento) del volumen del habitáculo y 30 decímetros cúbicos (6 por ciento) en el maletero. Como consecuencia de la reducción de peso, la potencia del motor se ha reducido de 120 a 84 caballos y el consumo cada 100 kilómetros ha pasado de 13,8 a 9,8 litros. Un factor importante en el programa de reducción de pesos del Reliant, así como en varios modelos de 1980 y 1981, lo ha constituido el cambio a tracción delantera con el motor montado transversalmente; ello permitió acortar el compartimiento del motor y eliminar la larga y pesada barra de transmisión, que requiere un ancho túnel a través del compartimiento de pasajeros. Al eliminar el diferencial del eje posterior se ha conseguido un maletero más corto.

Podría aligerarse notablemente el peso sustituyendo acero por aluminio, plásticos reforzados con fibra y estructuras rellenas de gomaespuma, un proceso de desarrollo ya en curso. Los pesos finales que se alcancen con dichas sustituciones rondarán, probablemente, el 40 por ciento del que consiguen ya los coches de nuevo diseño. Se ha argumentado a veces que el ahorro de combustible que puedan suponer los materiales ligeros podría anularlo el aumento de energía necesario para su fabricación. No hay tal. En líneas muy generales, una reducción del 1 por ciento en el peso de un turismo puede conllevar una reducción del 0,7 por ciento en la energía consumida durante la vida del coche. Puesto que un turismo actual consume aproximadamente 10 veces su peso en combustible a lo largo de una vida de 160.000 kilómetros, una reducción de un kilogramo de peso implica un ahorro de combustible de cerca de siete litros. Esto representa varias veces el cupo adicional de energía de fabricación que se paga en la sustitución por materiales ligeros.

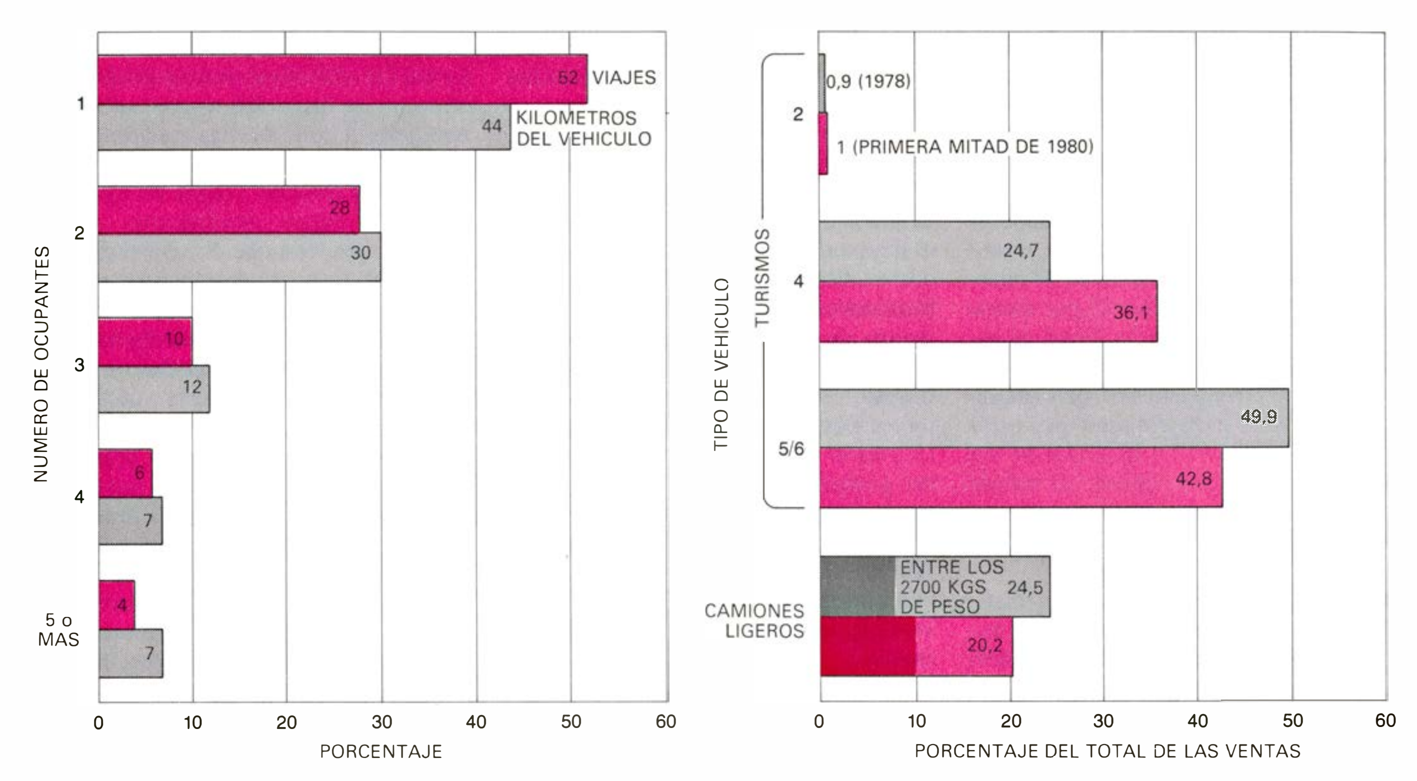
Permítasenos volver a un vehículo hipotético de cuatro plazas, ligero, cuyas resistencias aerodinámicas y de rodadura hayan sido reducidas, significativamente, por debajo de sus correspondientes en los vehículos actuales. Consideremos primero el motor. El rendimiento de un motor no es bueno cuando trabaja a una pequeña fracción de su potencia máxima. Importa, pues, equipar vehículos con motores cuya potencia no sea desmesurada. Las potencias máximas necesarias para un motor vienen dictadas por su capacidad de aceleración, de superar cuestas y de arrastrar cargas. Hemos elegido las prestaciones mínimas precisas que reflejan la importancia del rendimiento del combustible. Suponemos que los vehículos ligeros tienen que poder acelerar de cero a 80 kilómetros por hora en unos 13 segundos. Aunque esta capacidad de aceleración está por debajo de la media del parque móvil actual (de cero a 80 kilómetros por hora en unos 10 segundos), es mejor que las prestaciones de cierto número de modelos que gozan del favor del público. Partimos también de que el coche ha de mantener una velocidad de 88 kilómetros por hora en una pendiente del 5 por ciento. (Sólo un 3 por ciento de las carreteras norteamericanas tienen pendientes superiores.) El coche debe disponer de una potencia adicional para los accesorios tales como aire acondicionado y (en algunos vehículos) suficiente potencia extra para arrastrar un remolque de su mismo peso subiendo una pendiente del 5 por ciento a 64 kilómetros por hora.

Atendamos ahora a las implicaciones de estas prestaciones requeridas por el motor de nuestro vehículo hipotético, que tendrá un "peso de prueba" (la tara más 140 kilogramos, carga media de conducción en ciudad) de 1000 kilogramos. Este peso se mueve en la órbita del peso de prueba de los vehículos de cuatro plazas más ligeros que están en venta en los Estados Unidos. Con un esfuerzo sin tregua por reducir peso, los 1000 kilogramos podrían convertirse fácilmente en un peso de prueba típico para los futuros vehículos de cinco o seis plazas. (El Reliant de cinco plazas tiene ya un peso de prueba de sólo 1200 kilogramos.) Aunque la superficie frontal de nuestro vehículo hipotético será aproximadamente la misma de los vehículos corrientes (dos metros cuadrados), el coeficiente de resistencia aerodinámica estará en la parte extrema inferior de la gama actual, 0,4. (La resistencia aerodinámica es la medida relativa de la resistencia que presenta al aire un cuerpo respecto a otros objetos con la misma área frontal.) Una placa plana cuadrada tiene un coeficiente de resistencia de 1,17. Un valor de 0,4 constituye todavía una cifra bastante mayor que la que consiguen coches prototipos de formas aerodinámicas y "prácticas". La resistencia a la rodadura de los neumáticos del vehículo hipotético equivale al 1 por ciento de la fuerza gravitatoria. Esta se sitúa también en el extremo inferior de la gama en vigor. Pero hay prototipos de neumáticos cuyo valor de resistencia a la rodadura es un 20 por ciento inferior que la de cualquier neumático comercial que pueda adquirirse hoy.

¿Cuántos caballos necesita el motor de nuestro vehículo hipotético? La respuesta nos la dará el rendimiento de la transmisión que aporta la potencia a las



PRECIO DE LA GASOLINA, expresado en dólares constantes de 1980. Descendió entre 1950 y el invierno de 1973, cuando la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) inició la primera de una serie de importantes subidas de precio. De todos modos, la era del crudo barato no finalizó hasta marzo de 1979, con los aumentos forzados por la OPEP y la subida parcial de los precios de control de crudo y la gasolina. El valor medio de los impuestos federales y estatales combinados sobre la gasolina, 4 centavos por litro, en 1980 era un tercio inferior en términos reales al que había tenido la década anterior.



LOS CONDUCTORES norteamericanos van solos en el coche en el 52 por ciento de sus desplazamientos (*barra superior en color*). Viajes que representan el 40 por ciento del total de kilómetros recorridos por el vehículo (*barra superior en trama gris*). El porcentaje de desplazamientos con más de una persona en el coche y el porcentaje correspondiente a kilómetros recorridos están dados por los otros pares de barras. El ochenta por ciento de todos los desplazamientos en automóvil se hacen con una o dos personas en el coche y representan el 74 por ciento del total de kilómetros recorridos. Estas estadísticas fueron recogidas en el bienio de 1977-78 por la Oficina del Censo.

SITUACION ACTUAL DEL CAMBIO a vehículos más pequeños. Las barras superiores de cada pareja muestran la distribución porcentual de vehículos ligeros vendidos en los Estados Unidos en 1978. Las barras inferiores de cada par (*en color*) muestran las ventas mixtas en la primera mitad de 1980. Las ventas de coches de cuatro plazas crecieron cerca de un cincuenta por ciento, a expensas de coches mayores y camiones ligeros. La mezcla de camiones ligeros se desplazó también de una forma abrupta hacia vehículos más pequeños. La demanda de coches de dos plazas apenas ha sufrido modificaciones, debido a que la mayoría de los disponibles eran modelos deportivos.

ruedas. Se trata de una área de complejidad técnica. En los vehículos actuales, los engranajes de la transmisión sólo permiten seleccionar dos o tres regímenes de giro del motor para una velocidad dada en carretera. En consecuencia, en una aceleración de 0 a 80 km/h con un cambio de velocidad manual, la potencia media del motor está normalmente limitada al 80 por ciento de la potencia de punta.

La incapacidad normal de alcanzar la potencia de punta a todas las velocidades en carretera podría remediarse con la introducción de transmisiones continuamente variables. En combinación con unos simples sistemas de engranajes, esa transmisión permite elegir un rango continuo de velocidades del motor. Y así, para la mayoría de velocidades en carretera se puede disponer de cualquier potencia hasta la máxima medida del motor. Más importante para el ahorro de combustible resulta el hecho de que un microprocesador seleccione, automáticamente, el régimen del motor con mejor rendimiento asociado a una potencia dada.

Supondremos, pues, que nuestro vehículo ligero está dotado de una transmisión continuamente variable y que el motor puede funcionar a su régimen de rendimiento óptimo en toda la gama de velocidades en carretera a las que se consumen valores significativos de energía. Supondremos, asimismo, que las pérdidas combinadas en la línea de transmisión (la transmisión propiamente dicha, los engranajes auxiliares, los cojinetes de las ruedas y los frenos) constituirían el 10 por ciento de la potencia entregada a la transmisión. Las pérdidas vienen a coincidir con las registradas en los turismos actuales, dotados de cambio manual o con uno de los más modernos cambios automáticos de alto rendimiento. Supondremos, por último, que en períodos de crestas de consumo, la potencia consumida por los accesorios del vehículo puede limitarse a 0,5 caballos.

Fijados estos supuestos, nuestro vehículo hipotético necesitará un motor con una potencia máxima de unos 36 caballos. Lo que se traduce en un 25 por ciento menos de potencia que la del motor diesel del Volkswagen Rabbit de 1980, ligeramente más pesado. El motor de 36 caballos mostraría un rendimiento superior al de los motores actuales, considerablemente mayores, en el rango de 5 a 15 caballos, rango en el que debería ser utilizado la mayor parte del tiempo de conducción normal. Para los conductores que quieran tirar de un remolque pesado o para quienes prefieran un camión ligero, deberían existir opciones de motores con 20 o 30 caballos más, como encontramos hoy en el mercado.

No hemos mencionado las mejoras potenciales en el rendimiento térmico del propio motor, es decir, la eficiencia con que el motor convierte la energía del combustible en energía mecánica. El motor que hoy obtiene un rendimiento mayor en transporte es el diesel. Ventaja inherente de este motor, y de otros en los que el combustible se inyecta directamente en el cilindro, es que el rendimiento baja de un modo mucho más lento que la eficiencia de los motores "carburados", en los que el aire y el combustible se mezclan antes de llegar al cilindro. Otro dato a su favor es que, a diferencia de los motores carburados, no se les debe introducir combustible adicional cuando arrancan en frío.

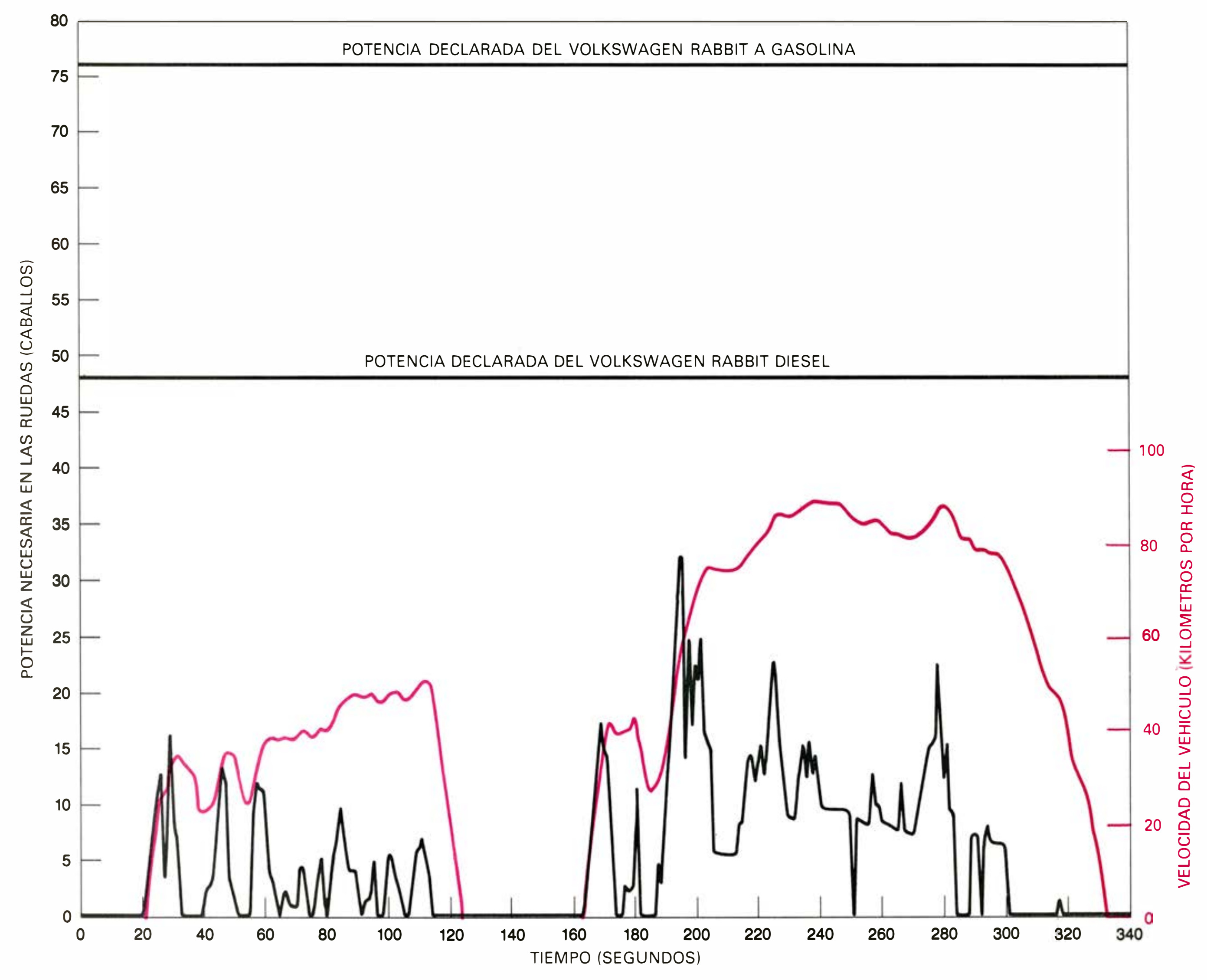
La generación actual de motores diesel de automoción está lejos todavía de alcanzar una optimización en ahorro de combustible. Hubo que contemporizar en este aspecto para obtener motores que funcionaran a regímenes eleva-

dos (para altas potencias máximas), de fácil arranque, poco ruidosos y que respetasen los límites de contaminación atmosférica que marca la ley. La concesión más destacada fue añadir una pequeña "precámara", donde se inyectaba el combustible y donde éste empezaba a arder. La precámara reduce el rendimiento de los motores diesel de automoción entre un 10 y un 15 por ciento respecto al de los grandes diesel de camión, que tienen inyección directa en el cilindro. Los ingenieros han estado buscando vías para eliminar la precámara en los diesel de automoción sin caer en contraprestaciones o en índices de contaminación inaceptables. Según parece, se hallan muy cerca de lograrlo.

Podría aumentarse también el rendimiento medio de los motores de automoción adoptando una técnica habitual en grandes motores de camión: sobrealimentación por turbocompresor. El turbocompresor es una combinación de una turbina y un compresor. La turbina es impelida por los gases de escape; el compresor, que está montado sobre el mismo árbol, empuja aire extra al cilindro y permite, por consiguiente, el quemado de una mayor cantidad de combustible en cada embolada. La sobrealimentación turbo posibilita el aumento de la potencia máxima de un motor de cilindrada dada o, lo que es lo mismo, la reducción del tamaño del motor para una potencia determinada. Conviene menguar el tamaño del motor porque los motores más pequeños tienen menos pérdidas por rozamiento y por otras causas. A la turbocompresión en los diesel de automoción se deben incrementos en el ahorro de combustible del orden de un 10 o un 15 por ciento.

Al calcular el consumo de nuestro coche ligero del futuro, hemos supuesto que los vehículos irían equipados con motores de inyección directa sobrealimentados y con una transmisión continuamente variable, bajo el control de un microprocesador, capaz de elegir el punto de mejor rendimiento en un "mapa" que describa la eficiencia del motor. En un mapa de este tipo, el rendimiento térmico del motor se representa como una función del régimen de giro del motor y de la cantidad de energía que se le suministra por vuelta.

El rendimiento es bajo cuando se entrega poca energía por vuelta: la mayor parte del trabajo realizado al expandirse los gases de combustión se destina a superar los rozamientos internos del motor. La potencia es proporcional al producto de la energía entregada por vuelta por el número de revoluciones por minuto (r.p.m.); las curvas de potencia constante en el mapa de rendi-



POTENCIA NECESARIA EN LAS RUEDAS de un vehículo típico, aquí el Volkswagen Rabbit de 1980. Es mucho menor que la potencia declarada. El modelo Rabbit diesel tiene un tercio menos de potencia que el de gasolina. La curva en negro representa la velocidad en los 5,5 primeros minutos, de un ciclo de conducción urbana de 23 minutos, diseñado por la EPA. La curva irregular en color refleja la potencia necesaria en las ruedas del coche en ese intervalo de 5,5 minutos. La potencia solicitada en las ruedas baja a cero cuando el coche decelera o está en ralentí. La cresta de potencia de 32 caballos se alcanza a los 196 segundos del ciclo de conducción, cuando el coche viaja a 58 km/h y está aumentando su velocidad a un ritmo de 4,8 km/h cada segundo.

mientos tendrán, pues, una configuración hiperbólica. De la inspección del mapa de rendimientos se desprende que, cuando sólo se necesita una pequeña fracción de la potencia máxima, se consigue el mayor rendimiento, manteniendo constantes las vueltas al régimen más bajo que la práctica permite (1000 r.p.m.) y ajustando la energía entregada por revolución de acuerdo con las exigencias. Si se utiliza más de cierta fracción de la potencia máxima (más del 20 por ciento en el ejemplo ilustrado), se puede obtener una potencia adicional en el máximo rendimiento manteniendo constante la energía entregada por revolución, a un valor alto, y aumentando el régimen del motor.

Una vez especificados el peso, resistencia aerodinámica y de rodadura de los neumáticos, potencia necesaria para los accesorios, pérdidas de la cadena de transmisión, características de la transmisión, tamaño del motor y mapa de utilización de un automóvil, no constituye tarea difícil calcular el consumo de combustible en un determinado ciclo de conducción. Para nuestros cómputos, hemos recurrido a los ciclos de conducción en ciudad y carretera de la EPA y expresado los resultados en términos de media ponderada de ambos, usando un 55 por ciento de conducción en ciudad y un 45 por ciento de conducción en autopista.

NECESIDADES	PRESTACIONES ESPECIFICAS	POTENCIA NECESARIA EN LAS RUEDAS (CABALLOS)
ACELERACION	PASAN DE 0 a 80 KM/H EN 13 SEGUNDOS	32
SUBIDA DE RAMPAS A VELOCIDAD CONSTANTE	DEL 5 POR CIENTO A 88 KM/H	29
ACCESORIOS	LUCES, VENTILADORES, AIRE ACONDICIONADO, ETC.	+ 3 (EN EL MOTOR)
REMOLQUE	REMOLCAR UN VEHICULO DEL MISMO PESO SUBIENDO UNA PENDIENTE DEL 5 POR CIENTO A 64 KM/H	+ 20

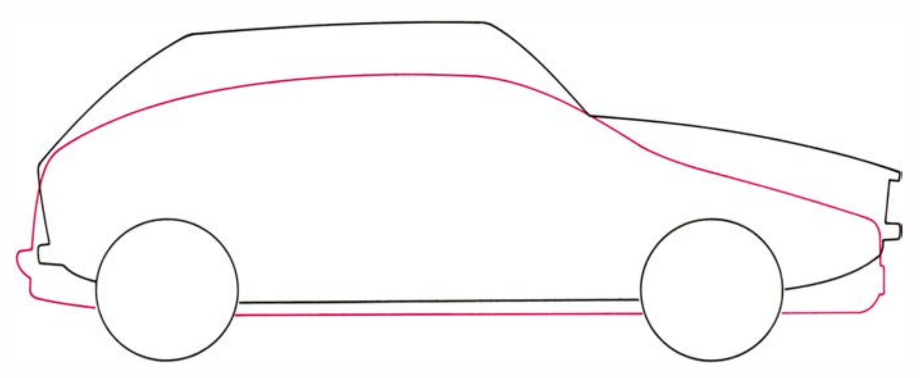
POTENCIA NECESARIA en las ruedas de un vehículo hipotético de cuatro plazas, capaz de superar ciertas prestaciones (*a la izquierda de la ilustración*). Calculada así por los autores, opinan ellos que las características en cuestión son razonables para una flota de vehículos de bajo consumo. Deberían bastar treinta y dos caballos en las ruedas para un vehículo con un peso de prueba de 1000 kilogramos (tara más 140 kilogramos), un área frontal de dos metros cuadrados, un coeficiente de resistencia aerodinámica de 0,4 y neumáticos con baja resistencia a la rodadura (1 por ciento del peso del vehículo). Si el vehículo se usa para tirar de un remolque de su propio peso, se necesitan 20 caballos extra (*lectura inferior del esquema*).

Para prever el parque móvil hipotético alcanzable en 1995 hemos extrapolado las características de los modelos medios y "los mejores" de que se disponía en 1980. En dicha extrapolación entra el peso del vehículo, área frontal, coeficiente de resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura de los neumáticos, tipo de transmisión y rendimiento térmico de la cadena completa. Para 1995 se fijaron dos tipos de valores: los que podían alcanzarse con la "mejor" tecnología actual y los que cabría esperar que se lograran con la avanzada tecnología disponible en el año 1995.

He aquí algunos ejemplos de lo que creemos podría hacerse. En 1980, el promedio y los de cuatro plazas más ligeros que se vendieron pesaban 1220 kilogramos y 900 kilogramos, respectivamente. En 1995 se podría llegar a un peso de prueba medio de 900 kilogramos en los vehículos dotados de la mejor tecnología actual. Con tecnología avanzada, estaría al alcance un peso de prueba medio de sólo 640 kilogramos (500 kilogramos de tara). En el extremo superior del rango de pesos, los camiones ligeros que en 1980 pesaban 1900 kilogramos (la media) y alrededor de 1100 kilogramos (los más ligeros) podrían reducirse en 1995 a una media de 1150 kilogramos y tal vez a una cifra muy baja: 800 kilogramos. El peso de los coches de cinco y seis plazas podría reducirse de un modo similar. Creemos que coches de dos plazas con una media de 680 kilogramos podrían estar disponibles en 1995 y que pesos de sólo 480 kilogramos (340 kilogramos de tara) serían viables para tales vehículos de tecnología avanzada.

Aunque el área frontal de los vehículos quizá no sea mucho menor en 1995 que la que era en 1980, sí cabe prever reducciones entre el 20 y el 40 por ciento en el coeficiente de resistencia aerodinámica medio, cifrado hoy en torno a 0,5. La resistencia a la rodadura de los neumáticos también puede menguar significativamente. La importancia de las reducciones en peso, resistencia aerodinámica y de rodadura de los neumáticos es obvia: el frenado, la resistencia del aire y las pérdidas en los neumáticos producen consumos de combustible equivalentes en la conducción media. Con un motor y una transmisión desarrollados, según se expuso antes, estimamos que podría doblarse el rendimiento térmico global de propulsión (el porcentaje de energía del combustible que llega a la rueda en forma de tracción) pasando la media del 12 por ciento en 1980 al 25 por ciento.

Al calcular el consumo de nuestros vehículos hipotéticos, se supuso que alcanzarían las prestaciones especificadas y que conducían a un motor de 36 caballos en un modelo de cuatro plazas. Hemos supuesto que, en promedio, se necesitan también 0,5 caballos para hacer funcionar los accesorios. A partir de esas premisas, calculamos que, con la mejor tecnología actual, toda la flota de vehículos ligeros de 1995 debería obtener un consumo de 4,1 litros/100 km), 40 por ciento de coches de cuatro plazas (con 3,4 litros/100 km) y de coches de dos plazas (con 2,9 litros/100 km) 40 por ciento de coches de cuatro plazas (con 3,4 litros/100 km) y 40 por ciento de coches mayores y camiones ligeros (con 4,1 litros/100 km), el consumo medio de la flota de vehícu-



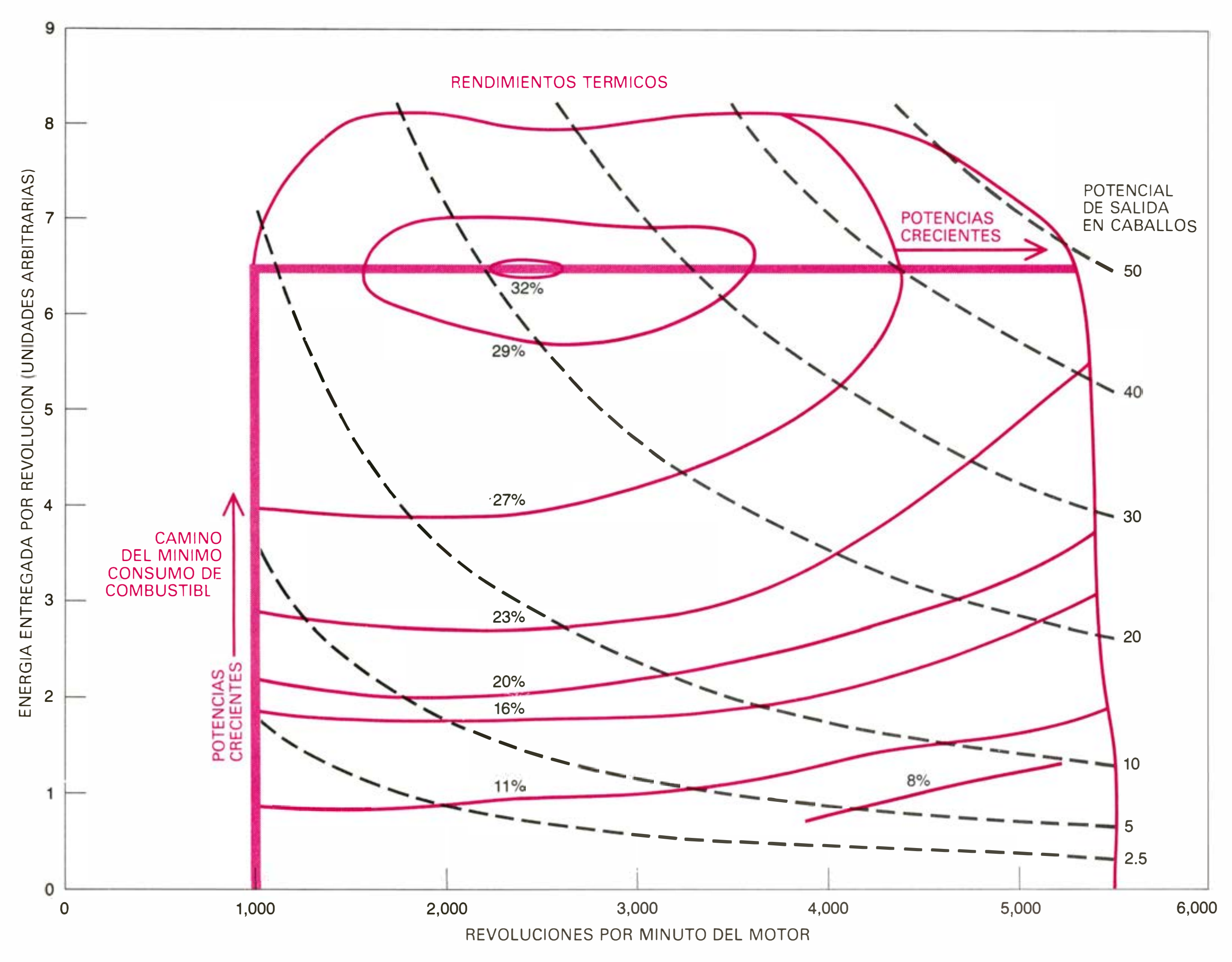
COEFICIENTE DE RESISTENCIA AERODINAMICA del Volkswagen Rabbit (silueta en negro). Se sitúa en torno a 0,4, algo por debajo del valor medio de 0,5 para los vehículos ligeros norteamericanos actuales. El coeficiente para una placa plana perpendicular al flujo es de 1,17. El perfil de color bosqueja un nuevo prototipo que ofrece más espacio interior que el Rabbit, y tiene una resistencia de 0,3.

los ligeros sería de 3,6 litros/100 km. Si elevásemos la potencia media del parque móvil en un 15 por ciento, crecería el consumo en 0,07 litros/100 km. Un aumento como el anterior conferiría al 20 por ciento de las unidades capacidad de remolcar o, de un modo alternativo, daría a la flota entera un tiempo de aceleración de 0 a 80 km/h inferior a 12 segundos. Con tecnología avanzada, una flota de la misma composición podría alcanzar un consumo de 2,6 litros/100 km.

La enorme diferencia entre las previsiones para 1995 y el consumo real de 1980, cifrado en 13,1 litros/100 km (camiones ligeros incluidos), motivará que el lector se pregunte: ¿No será ilusorio ese salto? ¿Hasta qué punto son fiables los números barajados? Tal vez el camino más sencillo para comprender el amplio campo de mejoras potenciales que prevemos sea caer en la cuenta de lo siguiente: el ahorro en la energía de propulsión que requieren las ruedas de un vehículo y las mejoras del rendimiento térmico medio de la cadena de transmisión tiene efectos multiplicativos. Por consiguiente, si el rendimiento térmico medio de la cadena de propulsión se mantuviese constante en su valor de 1980, de cerca del 12 por ciento, el efecto combinado de todos los demás avances en peso, resistencia aerodinámica y rodadura de los neumáticos podrían rebajar el consumo de la flota de 1995, basándose en la mejor tecnología actual, hasta sólo 7,6 litros/100 km y, para la flota fabricada en tecnología avanzada, hasta sólo 5,5 litros/100 km. Esos números no deberían parecernos poco creíbles, si tenemos presente que el modelo ligero (885 kilogramos de peso de prueba) de 1981, Toyota Starlet, equipado con un motor convencional, logra ya 6,1 litros/100 km en el ciclo de ciudad de la EPA y 4,44 litros/100 km en el ciclo de autopista, o 5,4 litros/100 en el ciclo mixto.

En el caso de que el peso medio de prueba (1500 kilogramos), la resistencia aerodinámica y la de rodadura de los neumáticos de la flota de 1980 se mantuviesen constantes y sólo se doblase –del 12 al 25 por ciento– el rendimiento térmico medio de la cadena de propulsión, el consumo medio de la flota pasaría de 13,1 litros/100 km a 6,3 litros/100 km; cifra ésta que intuitivamente no nos parecerá ya tan lejana de lo verosímil. Sólo cuando se combinan los efectos de la reducción de la potencia solicitada y de aumento del rendimiento de la transmisión llegamos a las sorprendentes previsiones de consumo del orden de 3,6 a 2,6 litros/100 km.

La mejor demostración de la validez de nuestra previsión debería involucrar un vehículo prototipo dotado de los sistemas descritos. Aunque ningún prototipo de los exhibidos reúne todos los sistemas propuestos, hay dos modelos recientes en experimentación que han incorporado los suficientes para dar va-



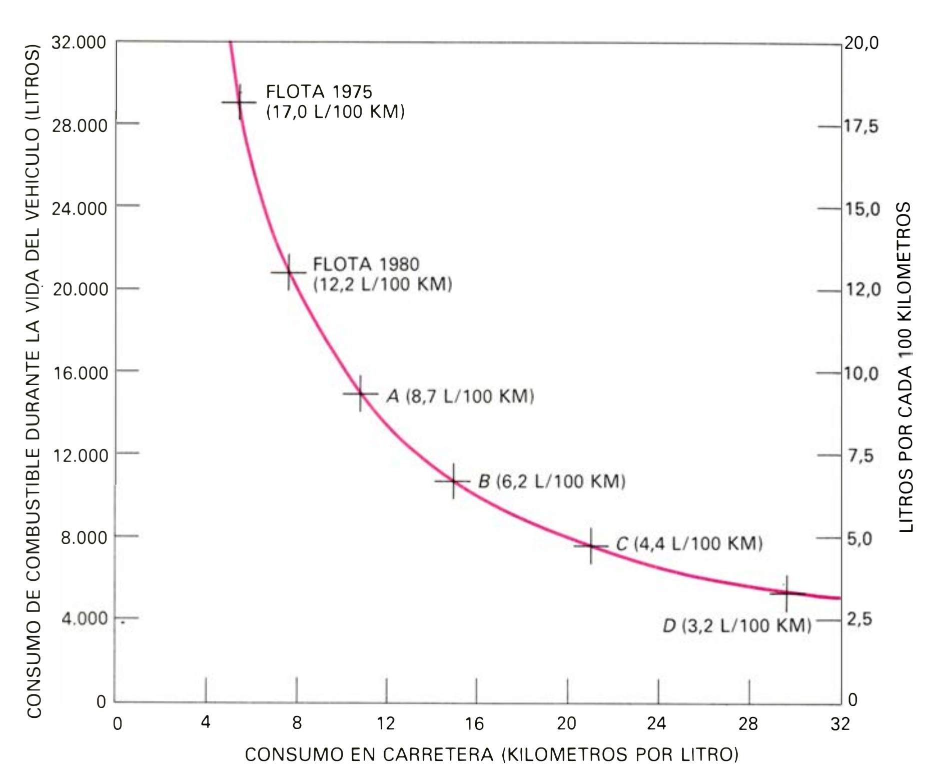
"MAPA" DE RENDIMIENTOS para el motor diesel de un Volkswagen Rabbit. Pone en relación las revoluciones por minuto (r.p.m.), la energía entregada por revolución, la potencia de salida y el rendimiento térmico (*trazos de color continuos*). La potencia de salida es proporcional al producto de la energía entregada por vuelta por las r.p.m.; de ahí que las siluetas de las líneas de potencia constante sean hipérbolas (*trazos en negro*). En vehículos con transmisión continuamente variable, un microprocesador podría elegir el punto de la hipérbola donde el motor muestra su mejor rendimiento. El segmento grueso de color es el lugar geométrico de los puntos de máximo rendimiento. Por debajo de 10 caballos a 1000 r.p.m. constantes es óptimo.

lidez a nuestros cálculos. El primero es un Volkswagen Rabbit con un motor diesel sobrealimentado construido en 1976 para el Ministerio de Transporte de los Estados Unidos. El vehículo, que tenía un peso de prueba de 1100 kilogramos, lograba una marca de consumo mixto de 3,9 litros/100 km con combustible diesel. Dado que el combustible diesel contiene un 10 por ciento más de energía por litro que la gasolina, los 3,9 litros/100 km del prototipo equivalen a 4,4 litros/100 km en vehículos alimentados por gasolina.

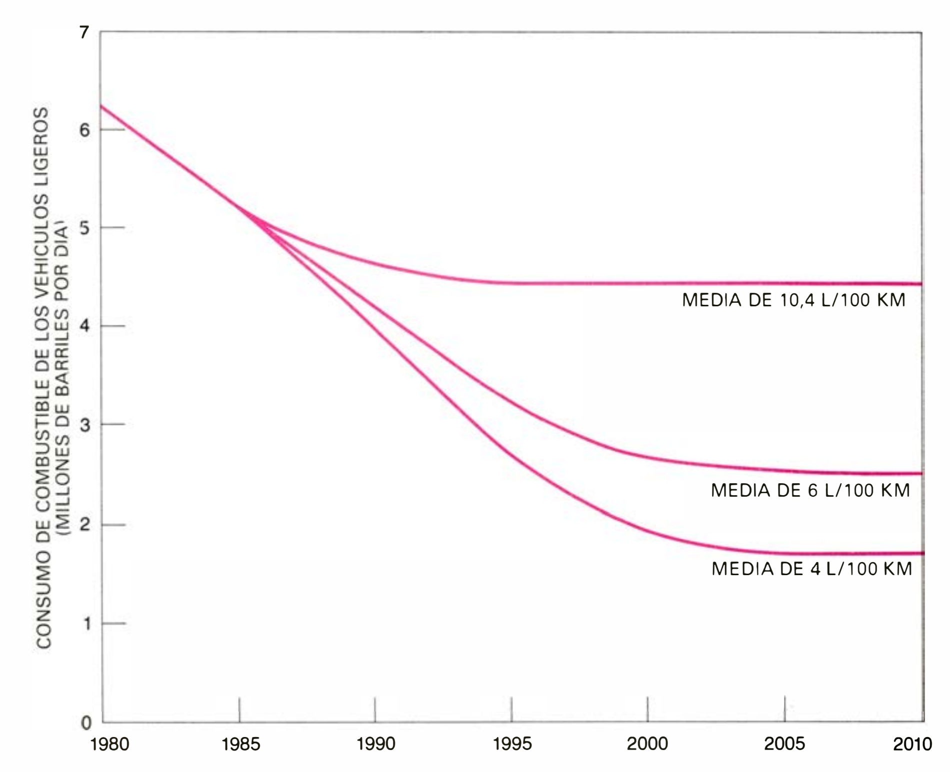
El segundo prototipo es un vehículo experimental de cuatro plazas, más reciente, fabricado también por Volkswagen. Dotado de un motor diesel de inyección directa, el vehículo ha logrado, según leemos en el informe correspondiente, un consumo de 3,4 litros/100 km en gasolina equivalente en el ciclo mixto ciudad-autopista. Si el informe no miente, el modelo ha igualado ya el consumo que habíamos previsto para un hipotético coche de cuatro plazas que habría de comercializarse en 1995; y lo ha logrado sin transmisión continuamente variable ni carrocería de baja resistencia aerodinámica. El prototipo incorpora, además, un sistema de ahorro de combustible que no hemos incluido en nuestro hipotético parque móvil, pero que está en avanzada fase de desarrollo: un volante de inercia que se pueda desembragar del motor. Ello permite que el motor se detenga automáticamente cuando el vehículo está parado o decelerado y rearrancar automática e instantáneamente con la energía almacenada en el volante cuando se vuelve a pisar el acelerador.

En nuestras previsiones no hemos ignorado el hecho, bien conocido por muchos compradores de modelos recientes, de que la prueba según procedimiento EPA conduce a consumos mixtos autopista-ciudad considerablemente menores (de un 15 a un 20 por ciento) que los que la mayoría de los coches consiguen en carretera. Por fortuna para los fines de nuestra argumentación, los vehículos cuyas características se aproximan más a las que hemos estado describiendo, vehículos con motor diesel de tracción delantera, logran consumos en carretera que se acercan mucho más a los valores de la EPA que los vehículos de diseño convencional.

Y basta en lo referente al potencial tecnológico. El razonamiento, sin embargo, no puede terminar aquí. Antes de que el país emprenda una medida determinada encaminada a economizar combustible, hay que conocer la



FIJAR UN OBJETIVO DE ECONOMIA para la próxima década implica admitir que los beneficios decrecen. El mismo porcentaje de reducción de consumo ahorra cada vez menos combustible. Reducir el consumo en carretera en un 40 por ciento pasando de 17,0 litros/100 km en 1975 a 12,2 litros/100 km en 1980 representa un ahorro de 7500 litros a lo largo de la vida típica de un coche (160.000 kilómetros). Otra reducción del 40 por ciento pasando a 8,7 litros/100 km (*A*) ahorraría 5700 litros más. Ulteriores mejoras del 40 por ciento a 6,2 litros/100 km (*B*), a 4,4 litros/100 km (*C*) y a 3,2 litros/100 km conducirían a ahorros progresivamente menores: unos 4200, 2800 y 2000 litros, respectivamente. Ello no obstante, el coste de las mejoras estaría justificado hasta un consumo de 4 litros por cada 100 kilómetros recorridos.



AHORRO POTENCIAL DE COMBUSTIBLE, previsto según tres objetivos hipotéticos que podrían fijarse para rebajar el consumo de vehículos ligeros a partir de 1995. El Gobierno Federal acaba de señalar una cota de 8,6 litros/100 km para los coches de 1985, medido según el ciclo de conducción mixto, ciudad-autopista, de la EPA. Este objetivo se superará probablemente en varios decílitros, cada 100 kilómetros, debido al reciente aumento de la demanda de vehículos de bajo consumo. En este caso, el consumo real en carretera de la flota de vehículos ligeros de 1985 tendría una media cercana a sólo 10,4 litros/100 km. La curva superior nos muestra el consumo de combustible previsto para el año 2010 para un número constante de kilómetros por año y vehículo, si no se introducen o se ordenan más mejoras en el consumo de combustible. La curva del medio y la inferior representan el consumo de combustible en el caso de que el consumo real en carretera se eleve a 6 y 4 litros/100 km entre el año 1985 y el 1995.

relación existente entre el ahorro, por un lado, la seguridad, el aire puro y los costes, por otro. Detengámonos brevemente en uno y otro capítulo.

En la mente de todos está la preocupación de que los pasajeros de vehículos pequeños y ligeros se hallan expuestos a mayores riesgos de heridas graves o de muerte por accidente. Las estadísticas recogidas por la Oficina Nacional de Seguridad del Tráfico en Autopistas, hacia mediados de los setenta, muestra que así ocurre. El riesgo de heridas graves o de muerte por accidente aumenta al disminuir el peso del vehículo. Como caso extremo, los ocupantes de los vehículos más ligeros sufren casi doble riesgo que los de los vehículos más pesados. El estudio demostraba también que el uso de los cinturones de seguridad reducía el peligro, en todos los modelos, en más de la mitad. En consecuencia, los ocupantes de los vehículos más ligeros que abrochaban sus cinturones de seguridad tenían menos riesgos que los de los coches más pesados que hacían caso omiso de dicha protección. (Hoy los norteamericanos se ciñen el cinturón de seguridad a lo largo de sólo el 10 por ciento del tiempo.)

El riesgo aumentado de accidente en vehículos ligeros se compensa, en parte, con el hecho estadístico de que, kilómetro por kilómetro, los conductores de vehículos subcompactos parecen tener entre un 10 y un 30 por ciento menos de accidentes que los conductores de vehículos mayores. Es más, una de las principales razones de aumento de riesgo en la conducción de coches pequeños, el choque con vehículos pesados, se está debilitando a buen ritmo con el aligeramiento de los coches grandes. El cambio hacia vehículos más ligeros no deja por ello de obligar a los fabricantes a mejorar la seguridad pasiva de sus modelos, a medida que modifican los diseños para ahorrar combustible.

Se espera que los nuevos vehículos de turismo vendidos en los Estados Unidos superen una prueba de choque a 48 km/h para todos los modelos diseñados hasta 1985. El trabajo realizado por la Oficina Nacional del Tráfico en Autopistas revela que, a pesar de todo, queda aún mucho camino por recorrer en el avance de la seguridad pasiva de los coches ligeros de cuatro plazas. La seguridad de los coches ligeros de ciudad, de dos plazas, puede plantear un reto especial, menguado sólo en parte por el hecho de que estos coches están pensados para su conducción en límites urbanos, donde la velocidad media ronda los 48 km/h. Urge, a nuestro parecer, un programa internacional de cooperación que investigue los diseños seguros para dichos vehículos.

Otro factor de importancia capital, a tener en cuenta en los nuevos diseños pensados para un sustancial ahorro de combustible, es la contaminación atmosférica; en particular, la del motor diesel, cuya popularidad va en aumento. Los niveles de contaminación emitida por el diesel son altos en dos tipos inquietantes: óxidos de nitrógeno (que incrementan las dificultades respiratorias y contribuyen a la formación de niebla y a la lluvia ácida) y las pequeñas partículas que se alojan profundamente en los pulmones y acarrean sustancias químicas mutágenas que pueden resultar cancerígenas. Para una misma potencia de salida, los motores diesel emiten una cantidad de estos dos contaminantes mayor que los motores de gasolina.

Se espera que, para 1983, los coches animados por motores diesel con precámara, en particular los de tamaño pequeño, respetarán los límites federales de óxido de nitrógeno (0,6 gramos por kilómetro), que se está aplicando a los vehículos animados por motores de gasolina que salen este año. Se prevé, aunque es menos probable, que motores diesel de mayor rendimiento con inyección directa respeten también esos máximos.

En lo relativo a la emisión de partículas, cabe presumir que los pequeños motores diesel alcanzarán el límite de 0,12 gramos por kilómetro establecido por la EPA para los vehículos de 1985. Y si rozan ese techo, una tal emisión de 0,12 gramos por kilómetro multiplicará por 20 la cantidad de partículas emitidas por un vehículo de sus proporciones alimentado por gasolina. Siguen, pues, sin resolverse los efectos en la salud humana del material mutágeno que transportan las partículas de los diesel. De cualquier suerte, una fracción cada vez mayor de coches diesel en las ciudades aumentará la cantidad ya existente de humos de ese origen, que

FACTOR	VALOR APROXIMADO EN LOS EE.UU. PARA LOS MODELOS DE 1980		MEDIA ALCANZABLE PREVISTA EN 1995	
	MEDIOS	OPTIMOS	MEJOR TECNOLOGIA ACTUAL	TECNOLOGIA AVANZADA
PESO DE PRUEBA EN KILOGRAMOS				
2 PLAZAS	1320	1020	680	480
4 PLAZAS	1220	900	900	640
5/6 PLAZAS	1680	1150	1150	800
CAMIONES LIGEROS	1900 (TOTAL)	1150	1150 (INDIVIDUAL)	800 (INDIVIDUAL)
AREA FRONTAL (METROS CUADRADOS)	2,0	1,8	1,8	1,8
COEFICIENTE DE RESISTENCIA AERODINAMICA	0,5	0,4	0,4	0,3
RESISTENCIA DE LOS NEUMATICOS A LA RODADURA (KILOGRAMOS DE FUERZA DE RESISTENCIA POR CADA 500 KILOGRAMOS DE PESO)	7	5	4	3,5
TRANSMISIONES	3 VELOCIDADES	5 VELOCIDADES	CONTINUAMENTE VARIABLE	
RENDIMIENTO TERMICO MEDIO GLOBAL (PORCENTAJE)	12	20	25	25

CARACTERISTICAS DE LOS VEHICULOS DE 1995 previstas por los autores a partir de la mejor tecnología actual y de la avanzada tecnología que cabe esperar para entonces. Los valores "medios" y "óptimos" para vehículos de 1980 se citan a título comparativo. La mayor diferencia entre las dos previsiones para 1995 reside en el peso y la resistencia aerodinámica: los vehículos que incorporen tecnología avanzada podrían tener una tara y resistencia aerodinámica reducidas en un tercio de su valor. Ello acarrearía una notable ganancia en el ahorro de combustible respecto al gasto actual.

TIPO DE VEHICULO	AREA FRONTAL (METROS CUADRADOS)		TALLA DEL MOTOR (CABALLOS)		AHORRO DE COMBUSTIBLE (LITROS CADA 100 KILOMETROS)	
	MEJOR TECNOLOGIA ACTUAL	TECNOLOGIA AVANZADA	MEJOR TECNOLOGIA ACTUAL	TECNOLOGIA AVANZADA	MEJOR TECNOLOGIA ACTUAL	TECNOLOGIA AVANZADA
2 PLAZAS	1,7	1,6	25	18	2,9	2,1
4 PLAZAS	1,7	1,7	31	23	3,4	2,5
5/6 PLAZAS Y CAMIONES LIGEROS INDIVIDUALES	2,0	1,9	38	28	4,1	2,9

AHORRO ESTIMADO DE COMBUSTIBLE calculado por los autores para vehículos hipotéticos de 1995, dotados de transmisión de variación continua y motores diesel. La carrocería y los neumáticos incorporan la mejor tecnología actual o bien tecnología avanzada. El menor peso de los vehículos de avanzada tecnología permite una reducción del 27 por ciento en la talla del motor. Los vehículos de tecnología avanzada consumen un 40 por ciento menos que los construidos con la mejor tecnología actual, gracias a su aerodinámica y neumáticos. El ahorro energético se ha aumentado un 10 por ciento, ya que el combustible diesel contiene un 10 por ciento más de energía por litro que la gasolina. (Por tecnología avanzada se entiende su desarrollo hacia 1995.)

los habitantes rechazan y que, además, reducirá la visibilidad urbana. Aunque no hay razón para considerar insuperables los problemas de contaminación que plantea el diesel, deberían suscitar una búsqueda incesante de grupos motopropulsores de alto rendimiento que sean más limpios.

A este respecto, es oportuno destacar que se dispone de una variante de los motores de gasolina que ofrece un buen rendimiento, es relativamente limpia y no exigirá ninguna ruptura drástica con la tecnología tradicional de automoción. Aludimos al motor de carga estratificada de inyección directa. La característica que distingue a dichos motores es que la carga, o mezcla aire-combustible, está estratificada en su cámara de combustión, no homogénea, en el momento en que se inicia la combustión. Se suprime así, de raíz, la formación de óxidos de nitrógeno. La estratificación permite también quemar mezclas aire-combustible que no arderían si el combustible estuviese mezclado uniformemente con el aire, habida cuenta de la pobreza en que se encuentra aquél. De lo que se desprende que los motores de carga estratificada de inyección directa manifiestan unos rendimientos comparables con los que ofrece el diesel.

Los motores de combustión estratificada queman combustibles distintos de la gasolina, de los que tal vez sea el metanol el más importante. Por obtenerse a partir del carbón o de materia vegetal, el metanol constituye un combustible prometedor para la era postpetrolífera. Un motor de metanol, plenamente optimizado, combina una emisión de contaminantes muy baja con un alto rendimiento térmico (mayor, a buen seguro, que el de un motor diesel equivalente). Somos de la opinión de que la tecnología de los motores alimentados con metanol debería recibir un impulso vigoroso.

Otra alternativa posible a los motores de combustión interna es la del motor eléctrico. Debido a las limitaciones de capacidad de almacenaje de las baterías, los coches eléctricos resultan, de momento, sólo de interés para recorridos cortos. La conducción de vehículos eléctricos comporta, hoy por hoy, la conservación de petróleo y gas natural, pues sólo aproximadamente una cuarta parte de la electricidad que se gasta en los Estados Unidos tiene su origen en estos combustibles especiales. A la hora de desarrollar una estrategia para la automoción en la era postpetrolífera, habría que comparar el costo global de la conversión del carbón o de materia vegetal en metanol para motores de combustión interna con el coste invertido en la conversión de esos mismos materiales en energía eléctrica para la carga de baterías de los vehículos eléctricos. De acuerdo con el nivel tecnológico actual, se diría que la solución del metanol surgiría como la forma más eficaz de utilización del combustible primario.

Vayamos ahora al capítulo de los costes. ¿Hasta qué punto están justificados los gastos en desarrollo y reequipamiento para lograr un cierto nivel de ahorro? Entra en juego aquí el principio de los beneficios decrecientes. Se puede trazar una simple curva que relacione el ahorro de combustible, en litros cada 100 kilómetros, en función del consumo de combustible durante la vida típica de 160.000 kilómetros que tiene un automóvil [*véase la ilustración superior de la página 17*]. Dicha curva muestra que, al reducir en un 10 por ciento el consumo de un vehículo que gaste 16,0 litros/100 km pasándolo a 14,4 litros/100 km, se ahorrarían 2500 litros de combustible a lo largo de la vida del vehículo, mientras que al reducir en un 10 por ciento el consumo de un vehículo que gaste 3,3 litros/100 km pasándolo a 3,0 litros/100 km ahorraría sólo 480 litros.

Hablando en sentido estricto, la diferencia entre el precio de venta del vehículo de 3,0 litros/100 km por ejemplo y el de 3,3 litros/100 km no debería exceder del valor de los 480 litros de combustible ahorrados. Ahora bien, en algún momento, definido a corto plazo por la incidencia que tiene en la estabilidad internacional la reducción de las importaciones norteamericanas de crudo y tal vez a largo plazo por el costo de los combustibles no derivados del petróleo, el costo de la energía ahorrada se convertirá en un valor tan alto que ya no resultará oneroso invertir en mejoras para el ahorro de combustible.

Se han realizado muchos análisis de costos y beneficios. La mayoría coinciden en que el valor del ahorro de combustible superará su coste por lo menos hasta que la industria esté equipada para fabricar vehículos con una media de consumo de 6 litros/100 km. Sin embargo, los analistas no se han puesto de acuerdo todavía en cuánto supondrá, desde el punto de vista económico, bajar de los 6 litros/100 km. La mayoría de los análisis costes-beneficios tienden a sobrevalorar las inversiones destinadas a ahorrar combustible, pues no sopesan debidamente efectos sinergéticos tales como los que existen entre la reducción de la potencia necesaria en las ruedas y la consiguiente reducción del tamaño del motor. De acuerdo con nuestros propios cálculos, y a consecuencia de dichos efectos, el coste de cada mejora del consumo adicional sería, para el comprador, de menos de 25 centavos de dólar por litro de combustible ahorrado hasta que se alcanzasen consumos del orden de los 4 litros/100 kilómetros.

De ello no habría que concluir necesariamente que los americanos opten por el tipo de vehículos de bajo consumo descrito, instados por la subida del combustible. Por ejemplo, la diferencia en consumo entre un coche de 6 litros/100 km y otro de 4 litros/100 km es de 0,02 litros por kilómetro, que in-

cluso para un combustible que costara medio dólar el litro conduciría a un ahorro de sólo un centavo por kilómetro. (A comparar con el coste total de 15 centavos el kilómetro por poseer y utilizar un vehículo ligero actual.) Aun cuando el modelo de 4 litros/100 km no valiera más que el de 6 litros/100 km, es fácil imaginar que un hipotético comprador despreciaría un ahorro tan pequeño (unos 170 dólares por año) si, por contrapartida, no posee, por ejemplo, un motor más potente. Si el precio del coche de 4 litros/100 km sube unos cientos de dólares más, la tentación será mayor si cabe, aunque el combustible economizado amortice el coste extra en unos dos años. Eso nos enseña la historia reciente. En Europa, donde a mediados de los setenta los precios de la gasolina rondaban al medio dólar por litro en dólares de 1980, el consumo medio de los turismos no bajó de los 9,4 litros/100 km.

Nadie espera que la industria del automóvil, por su propia iniciativa, produzca y desarrolle vehículos de menor consumo mientras la "mano invisible" del mercado no la fuerce a ello. Aunque no cueste más, en definitiva, producir un vehículo ligero de bajo consumo que otro pesado, potente y despilfarrador, la renovación de las plantas para fabricar una nueva generación de coches valdrá decenas de miles de millones de dólares, además de los exigidos para ponerse al día. Es lógico que la industria automovilística estadounidense, que tiene ya problemas financieros en la renovación de equipos para sacar una flota de turismos de 12 a 8 litros/100 km hacia la segunda mitad de los ochenta, se muestre remisa a tomar siquiera en consideración otra ronda de inversiones de ese montante y a corto plazo. A pesar de todo, el informe del anterior Ministro de Transportes Goldschmidt sugiere que, si existiese "demanda de un rendimiento radicalmente mayor en el parque móvil nacional, inducida por fuerzas de mercado o no de mercado (en este período), y si el clima de inversiones no ha mejorado, el atractivo de la producción del otro lado del mar aumentará drásticamente".

Por desgracia, se tardará unos 15 años en sustituir los vehículos en funcionamiento por una nueva flota: 5 años para reequiparse y 10 para reemplazar el parque existente. La reducción de su dependencia del crudo importado es asunto de interés nacional de los Estados Unidos. Si se reconoce, además, que una fuerte bajada de consumo es crucial para lograr dicho objetivo, entonces la tarea resulta demasiado importante como para dejarla sólo en manos de las impredictibles fuerzas del mercado. Creemos, pues, necesario que el Gobierno se plantee los objetivos de la industria a largo plazo a fin de mejorar el ahorro de combustible a partir de 1985.

El Gobierno federal debería darle garantías a la industria del automóvil de que las fuerzas de mercado apoyarán las mejoras de consumo ordenadas que se desean, comprometiéndose con dos medidas. Primera, debería establecer un impuesto al "engullido de gasolina" medio de cada firma; es decir: cuando el ahorro medio de combustible de una flota fabricada por una compañía caiga por debajo del objetivo marcado, la compañía estaría obligada a pagar un impuesto proporcional al exceso y al número de coches que produzca. El pago de dicho impuesto se reflejaría en el coste más elevado (para cubrir el impuesto) de los vehículos menos economizadores. (En otras palabras, la compañía podría servir a un pequeño número de clientes con gustos caros si pudiese hallarlos.) Segunda, el Gobierno podría decretar un impuesto alto sobre el consumo de combustible para vehículos, siguiendo el ejemplo de casi todos los demás países importadores de petróleo. El ciudadano medio, debidamente informado, salvaría ambos impuestos comprando los vehículos de menor consumo en consonancia con sus necesidades. Desearíamos que la moda actual antinormativa de Washington no se inhibiese a la hora de establecer un mercado seguro para una nueva generación de vehículos de bajo consumo.

Para indicar los ahorros de combustible que están en juego, señalaremos tres líneas de previsión que se fundan en otros tantos objetivos economizadores de la flota de coches que salga al mercado en 1995. En cada caso, y en aras de la simplicidad, supondremos un parque constante de 150 millones de turismos y camiones ligeros, conducidos a una media de 10.000 kilómetros por año, ponderada de modo que los vehículos más nuevos se conducen más y, menos, los más antiguos. Consideraremos tres posibilidades: el consumo medio para un vehículo ligero nuevo permanece en el nivel de 1985 de 10,2 litros/100 km previsto por el Ministerio de Energía, baja a 6 litros/100 km o disminuye a 4 litros/100 km entre 1985 y 1995, para estabilizarse en adelante.

De acuerdo con el primer marco, el consumo de combustible de los 150 millones de coches y camiones ligeros prosigue su curva descendente, desde 1985, a medida que los vehículos más viejos, y más consumidores, se van retirando, estabilizándose finalmente en el 85 por ciento de la demanda de 1985, unos 4,4 millones de barriles diarios. De acuerdo con el segundo marco, el consumo de combustible en el año 2005 cae a la mitad de la demanda en 1985, hasta unos 2,5 millones de barriles diarios. De acuerdo con la tercera previsión, el consumo en 2005 cae a unos 1,7 millones de barriles diarios. La diferencia entre el primer marco y el segundo superaría la capacidad del oleoducto de Alaska. El "flujo" de combustible ahorrado podría continuar indefinidamente, lo que no puede decirse del flujo de crudo de Alaska o de cualquier otra parte. Si el parque estadounidense de vehículos ligeros aumentase mucho más allá de los 150 millones, o si la cifra media de kilómetros por vehículo y año creciera significativamente, estos marcos previstos deberían modificarse en justa correspondencia.

Si tenemos delante la proyección que prevé una sustancial reducción del suministro de petróleo nacional, muy por debajo del nivel actual de 10 millones de barriles diarios, en esta década, y pensamos cuán caro será el suministro complementario, y en descenso, de sintéticos, cabe deducir que el primer marco, que pronostica una reducción en el consumo de combustible de los vehículos ligeros de sólo 1,5 millones de barriles diarios, nos lleva a una política nacional peligrosa. Se hace imperioso fijar objetivos de ahorro de combustible mucho más ambiciosos que los ya marcados (8,6 litros/100 km con el procedimiento combinado de la EPA) a partir de 1985, llegando cuanto antes a un nivel próximo a los 4 litros/100 km. Como una parte más de los objetivos superiores, sería de interés nacional asegurar que la industria nacional del automóvil logre las metas señaladas sin problemas de financiación. A lo largo de las dos próximas décadas, por lo menos, el flujo de crudo ahorrado que podría "producir" la industria del automóvil no es menor que el flujo de combustible líquido que podrá producir la industria nonata de combustibles sintéticos. No sólo los costes de capital serían menores, sino también los del medio ambiente. Y, por último, ocupar el primer puesto en la carrera internacional de ahorro de combustible quizá sea la receta exacta que necesita la industria norteamericana del automóvil para salir de su estancamiento.

Genes fragmentados

En los organismos superiores, la mayoría de los genes son discontinuos. El ADN codificador está salpicado de secuencias no informativas que se eliminan, una vez transcritas, para formar el ARN mensajero que se traducirá en proteína

Pierre Chambon

La idea de gen, aunque no significara siempre lo mismo, ha servido de hilo conductor de la historia de la biología moderna. En el siglo XIX, Gregor Mendel demostraba que los rasgos característicos de los organismos estaban determinados por unos "factores" hereditarios, presentes en las células germinales. El biólogo danés Wilhelm Johannsen llamó genes a esos factores. A principios de este siglo, los genes se definieron como elementos discretos dispuestos de forma lineal en los cromosomas. El ácido desoxirribonucleico (ADN) se identificó como el material hereditario hace sólo 35 años, y, en 1953, se determinó su estructura; el gen adquiría así realidad física y se sugerían implícitamente algunos aspectos de su función. A lo largo de los 20 años siguientes, biólogos y genetistas moleculares, trabajando principalmente con la bacteria *Escherichia coli,* fueron desentrañando la manera como se codifica en ellos la información genética y su traducción en las proteínas que determinan la estructura y función de células y organismos.

Se vio que, al menos en bacterias, un gen "estructural", con la información genética necesaria para fabricar una proteína, no era más que un trozo de ADN contiguo y discreto; en ese segmento, la secuencia lineal de las subunidades llamadas nucleótidos se correspondía directamente con la secuencia lineal de aminoácidos de la proteína. ¿Por qué no habría de extenderse ese principio de colinearidad a las células superiores? La presunción se mantuvo hasta 1977, cuando se demostró que no era válida la generalización. La organización de los genes en mamíferos, aves y anfibios presenta diferencias fundamentales respecto de la que encontramos en bacterias; en efecto, la mayoría de los genes están fragmentados. Junto con otros hallazgos más recientes, el descubrimiento de los genes fragmentados revela que la organización genética de las células es más compleja, variable y dinámica de lo que se había sospechado.

La molécula de ADN es una larga y delgada hélice doble, cuyas cadenas son una sucesión de nucleótidos. Cada nucleótido se caracteriza por un grupo químico que se llama base: adenina (*A*), guanina (*G*), timina (*T*) o citosina (*C*). La información genética está determinada por la secuencia de estas bases. Un "codón" de tres bases sucesivas se corresponde con uno de los 20 aminoácidos que integran la cadena de proteínas. La información genética se transmite a través de un intermediario, el ácido ribonucleico (ARN). Sólo una de las dos cadenas del ADN se transcribe en una molécula de ARN complementaria, de acuerdo con ciertas reglas de apareamiento de las bases: una *A* del ADN se aparea con una *U* (por *u*racilo, que en el ARN sustituye a la timina del ADN) y *G* se aparea con *C*. En el caso de las bacterias, resulta así una molécula de "ARN mensajero", que se traducirá en proteína. Cada codón de la molécula de ARN dirige la incorporación de un aminoácido específico en la cadena de proteínas que está constituyéndose; este proceso de traducción comienza a partir del codón iniciador *AUG,* situado en el extremo llamado 5' de la cadena mensajera, y continúa secuencialmente hasta el codón terminal, situado en el extremo 3'. Como dije antes, existe colinearidad entre codones y los correspondientes aminoácidos.

Si cada aminoácido está determinado por un codón de tres nucleótidos, se sigue entonces que el gen estructural que lleva la información necesaria para elaborar una proteína de tamaño medio (alrededor de 300 aminoácidos) tendrá una longitud aproximada de 900 pares de bases. Las células procarióticas (células sin núcleo), como *E. coli,* poseen sólo un cromosoma, una molécula de ADN de unos tres millones de pares de bases, longitud que les permite fabricar, en principio, más de tres mil proteínas; esta cifra es coherente con el total de proteínas diferentes que se espera que fabrique una bacteria. El tamaño del genoma, o cantidad total de ADN presente en una célula, aumenta (en general) con la complejidad evolutiva de los organismos. En las células eucariotas, el ADN se halla en el interior de un núcleo, rodeado por una membrana. En los eucariotas superiores, como los mamíferos, el genoma consta de unos tres o cuatro mil millones de pares de bases de ADN, distribuidos en varios cromosomas (46 en el hombre). Esta cantidad podría fabricar más de tres millones de proteínas; pero, según se vio hace algunos años, aquí no concuerdan los cálculos deductivos y las cifras reales. Numerosos datos sugieren que, en los mamíferos, el número real de proteínas (y por tanto de genes estructurales) puede oscilar entre 30.000 y 150.000. ¿A qué viene, pues, tanto ADN?

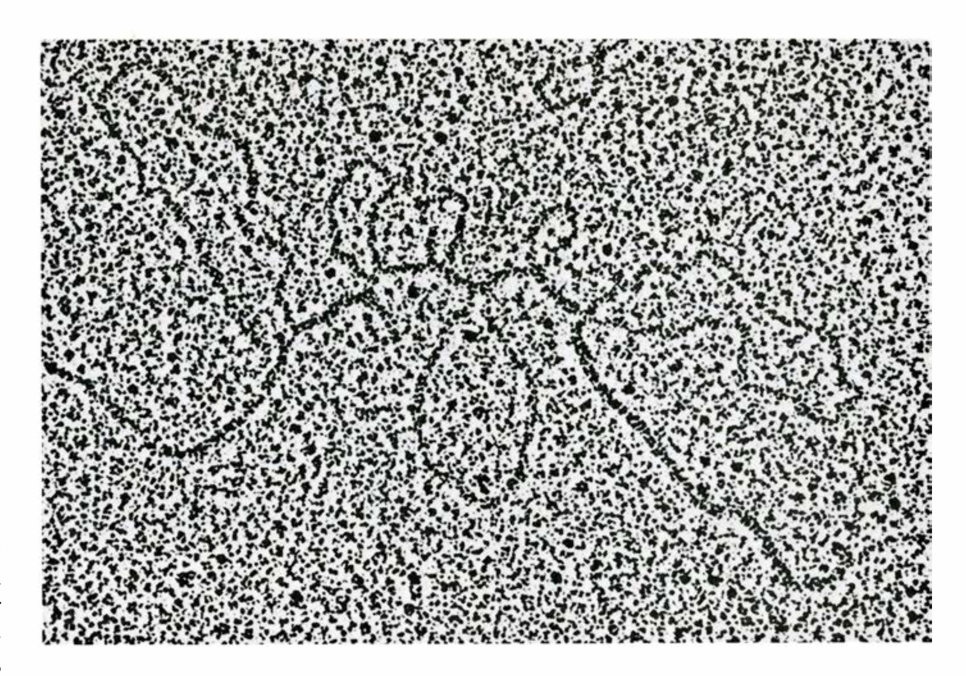
La investigación sobre el genoma de células eucariotas ha avanzado ya algunas razones. Las células eucariotas y procariotas poseen maquinarias genéticas diferentes. En las procariotas, la transcripción y la traducción tienen lugar a la vez y en el mismo sitio; en las eucariotas, sin embargo, los dos procesos están separados en el espacio y en el tiempo. En estas últimas, el ADN se transcribe en el núcleo, fabricándose una molécula precursora de ARN mensajero. Las moléculas precursoras "maduran" en el núcleo (se modifican sus extremos y se reduce significativamente su tamaño). Este ARN mensajero maduro atraviesa la membrana nuclear y pasa al citoplasma, donde se traduce en proteína.

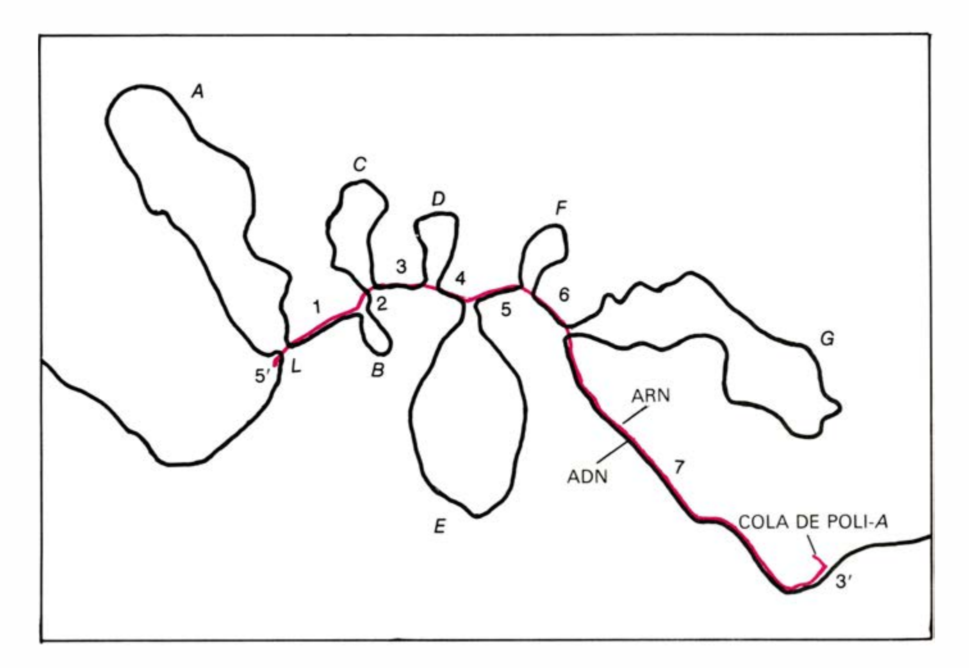
El propio proceso de maduración puede explicar ya algunas de las discrepancias entre la cantidad de ADN y la de ARN, y, por tanto, de proteínas en

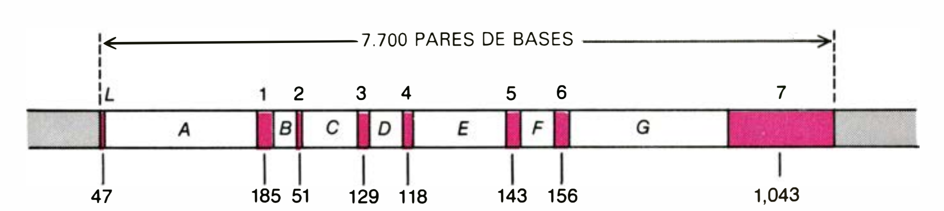
células eucariotas. (La existencia, en eucariotas, de secuencias de ADN muy repetitivas y de algunas secuencias intercaladas entre genes repetidos podría tener que ver también con las discrepancias antes mencionadas. Algunas de las secuencias de ADN que no llevan información relativa a la fabricación de moléculas podrían actuar de señales reguladoras de la transcripción.) Todo ello provoca una pregunta decisiva: ¿qué segmentos de la molécula de ARN precursora se eliminan durante el proceso de maduración? Para responderla se propusieron modelos que postulaban cortes en uno o en ambos extremos de la molécula precursora. Pero hasta hace muy poco no se podía probar la validez de estas explicaciones. La falta de técnicas adecuadas para aislar un gen dentro de un genoma que contiene varios miles de millones de pares de bases hacía imposible correlacionar las diferentes etapas de la maduración del ARN con formas específicas de organización del ADN. Las nuevas técnicas de recombinación *in vitro* de ADN (ADN recombinante) y de clonación molecular, que permiten obtener grandes cantidades de fragmentos de ADN del tamaño de un gen, han venido a resolver este problema.

Para clonar un fragmento de ADN es preciso "recombinarlo" con un vector que pueda introducirse en una bacteria huésped, y que pueda, por tanto, multiplicarse en ella. El vector puede ser un plásmido (un fragmento circular de ADN bacteriano no cromosómico) o un bacteriófago (virus que infecta a una bacteria). El ADN vector se rompe en un único punto por medio de un enzima denominado endonucleasa de restricción o restrictasa. Se conocen unos 100 enzimas de este tipo, cada uno de los cuales reconoce una secuencia breve y específica de nucleótidos como único sitio de corte. El fragmento a clonar se inserta en la molécula de ADN vectora, que previamente se ha cortado. El ADN recombinante se incuba en un cultivo de células bacterianas. Algunas de las células se "transforman" (si el vector es un plásmido) o "transfectan" (si es un fago), es decir, pasan a ser portadoras de una molécula de ADN recombinante.

La etapa siguiente consiste en seleccionar las células que llevan las moléculas de ADN recombinante. Si el vector utilizado es un plásmido, la selección se hace incorporando en el plásmido un gen que determine resistencia a un antibiótico; sólo las bacterias transformadas por el plásmido sobrevi-







ORGANIZACION EN FRAGMENTOS del gen de la ovoalbúmina. Se aprecia en la electromicrografía (*arriba*) y en su bosquejo (*centro*). Muestran el resultado de un experimento de hibridación entre un ADN monocatenario, que lleva el gen de la ovoalbúmina, y el ARN mensajero de la ovoalbúmina, que es la molécula que se traduce en proteína. En un gen fragmentado, las secuencias de ADN que portan la información para fabricar una proteína (exones) están separadas por secuencias "no codificadas" (intrones). El gen entero se transcribe en una molécula de ARN "precursora", se eliminan luego las secuencias correspondientes a los intrones y se unen las correspondientes a los exones para formar el ARN mensajero. La molécula híbrida que se observa en la fotografía se ha ampliado unos 180.000 veces. Los segmentos de ADN (*línea negra en el esquema*) y ARN (*línea de color*) que son complementarios se asocian formando regiones de cadena doble; las secuencias de ADN de estas regiones corresponden a los ocho exones (*L, 1-7*). Hay otros segmentos de ADN que no tienen secuencias complementarias en el ARN con las que asociarse, y forman bucles que sobresalen de la molécula híbrida; son los siete intrones (*A-G*). Se indican también los extremos 5' y 3' del mensajero, así como la secuencia de "poli-*A*" del extremo 3'. El esquema del gen incluye los siete intrones (*blanco*) y los ocho exones (*color*), junto con el número de pares de bases de cada uno de los exones; el tamaño de los intrones oscila entre 251 pares de bases (*B*) y unos 1600 (*G*).

virán y formarán colonias en un medio que contenga el antibiótico. Si el vector es un fago, las células transfectadas puestas sobre un "césped" de bacterias formarán un halo de lisis allí donde el fago recombinante se multiplique y mate a las bacterias.

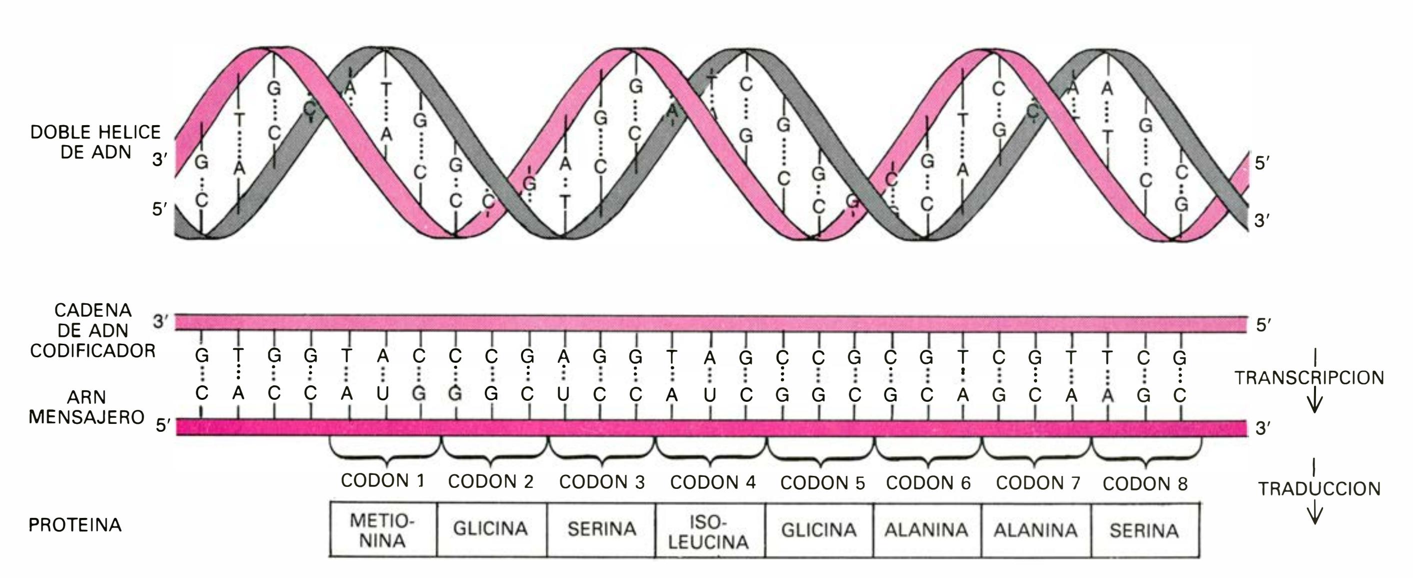
¿Cómo identificar ahora aquellas colonias bacterianas o halos de fagos que contengan el fragmento deseado de ADN? La técnica habitual se funda en el principio de la complementariedad y en las reglas del apareamiento de bases: dos cadenas sencillas de ácido nucleico hibridarán, o formarán una cadena doble, si complementan trozos considerablemente grandes de sus secuencias de nucleótidos. Las colonias transformadas por el plásmido (o los halos de fagos) se transfieren a un filtro de papel de nitrocelulosa. Al tratarlo con un agente alcalino, el ADN presente en las bacterias (o fagos) se libera y se desnaturaliza *in situ*; durante el proceso, las cadenas desnaturalizadas se fijan al papel.

Entramos en la etapa final. Se expone ese ADN a una molécula "testigo" específica, ARN o ADN desnaturalizado y marcado con un isótopo radiactivo, cuya secuencia se complemente con la del fragmento que se quiere purificar. Las moléculas testigo se "asocian" a las secuencias complementarias presentes en el ADN recombinante, formando moléculas híbridas y quedando por tanto fijadas en el papel cuando éste se lava para eliminar el resto de las moléculas testigo. Los híbridos marcados radiactivamente se detectan mediante autorradiografía: el papel se pone en contacto con una emulsión fotográfica y, después de un tiempo largo de exposición, el isótopo radiactivo (y por tanto el clon buscado) se detecta como un punto oscuro cuando se revela la película. Este proceso de hibridación tiene un gran poder resolutivo, permitiendo a un solo investigador ensayar varios cientos de miles de bacterias o fagos en una sola operación. Una vez identificado, el clon se puede cultivar a gran escala, produciendo así cantidades ilimitadas de un fragmento de ADN purificado.

Cuando mis colegas y yo emprendimos, en el Laboratorio de Genética Molecular de Eucariotas, de Estrasburgo, las investigaciones que condujeron al descubrimiento de los genes fragmentados, nuestro objetivo no se centraba en la estructura del gen, sino en el estudio de la diferenciación celular. Concretamente, queríamos saber cómo las hormonas sexuales femeninas –los estrógenos y la progesterona– controlaban la diferenciación de las células en el oviducto de la gallina y la expresión del gen de la ovoalbúmina, la proteína más abundante en la clara de huevo.

El genoma completo de un animal está presente en todos los núcleos del organismo, pero en una célula dada y en un momento determinado sólo se expresan (se transcriben a ARN mensajero) ciertos genes. La ovoalbúmina, una cadena de 386 aminoácidos, sólo se sintetiza en unas células muy especializadas de las gallinas: las células de las glándulas tubulares del oviducto, y sólo durante el proceso de la puesta. La diferenciación de las células de las glándulas tubulares y la expresión del gen de la ovoalbúmina están controladas por las hormonas sexuales femeninas; en ausencia de estas hormonas, el gen no se transcribe a ARN, y por tanto no se sintetiza la proteína. Para comprender el desarrollo de este proceso regulador a nivel molecular era preciso aislar el gen de la ovoalbúmina, tanto de las células de las glándulas tubulares como de otras células donde no se expresara el gen, y comparar su estructura en estas dos situaciones distintas. La disponibilidad de la técnica del ARN recombinante hacía factible este proyecto; y así nos pusimos a trabajar: clonar el gen de la ovoalbúmina de gallina.

Peter Humphries, Madeleine Cochet, Andrée Krust, Marianne Le Meur y Pierre Gerlinger dieron los primeros pasos. Purificaron el ARN mensajero de la ovoalbúmina, aprovechándose de que éste representa aproximadamente el 50 por ciento del ARN mensajero total en las células del oviducto de gallina. El ARN mensajero de la ovoalbúmina forma una cadena de

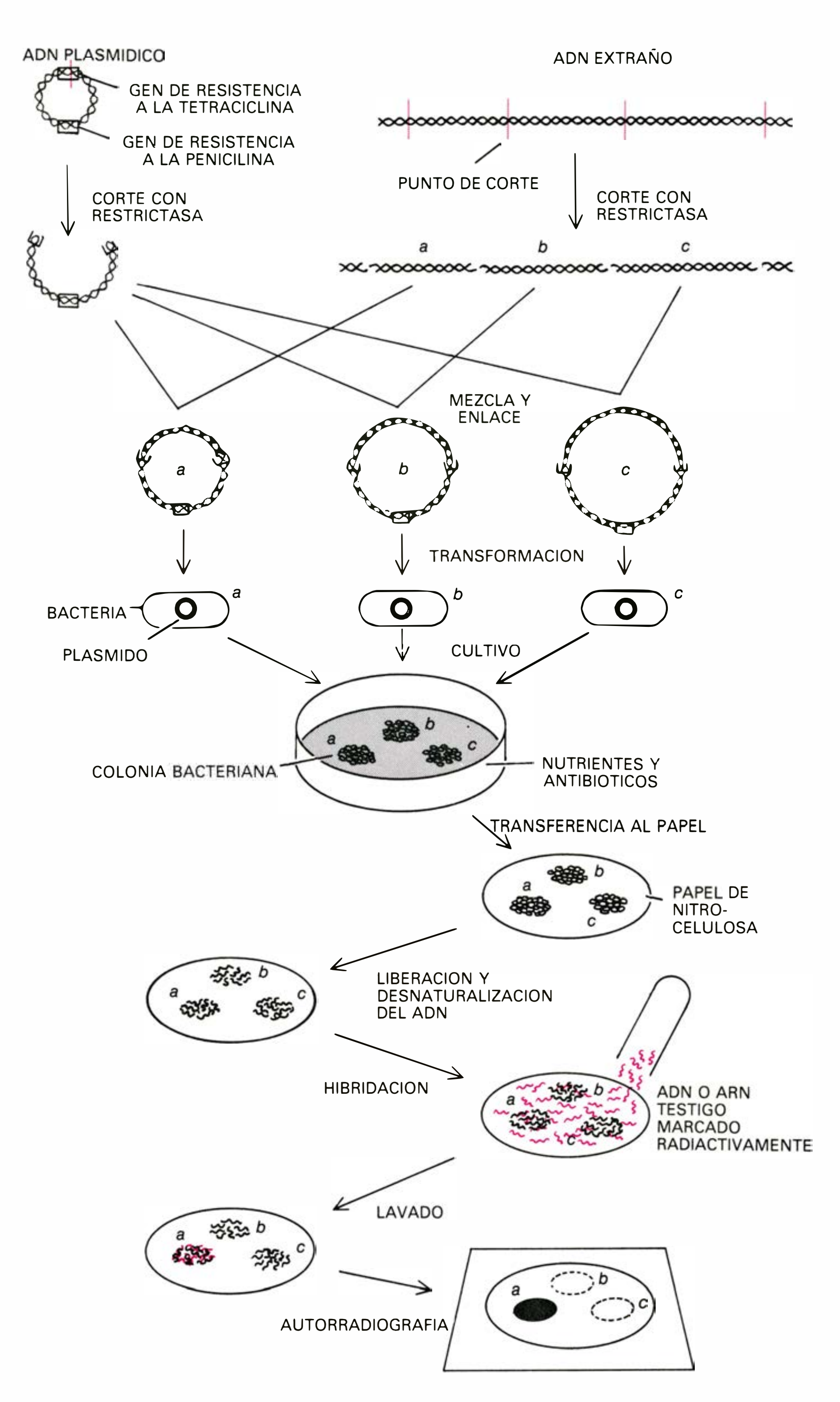


LA INFORMACION GENETICA se transmite de ADN a ARN y de éste a proteína. Se almacena en los genes, segmentos de la doble hélice de ADN. La información viene codificada por una determina secuencia de los cuatro grupos químicos conocidos como bases, que caracterizan a los nucleótidos que constituyen el ADN. Las bases son: adenina (*A*), guanina (*G*), timina (*T*) y citosina (*C*). Las dos cadenas de la hélice están unidas por puentes de hidrógeno (*líneas punteadas*) entre dos bases complementarias; *A* se aparea siempre con *T* y, *G*, con *C*. Cada cadena de ADN tiene un extremo 5' y otro 3' y las dos cadenas poseen polaridades opuestas. La información se traduce en proteína de forma indirecta. En primer lugar, a partir de una de las cadenas de ADN (*color claro*) se transcribe una cadena complementaria de un ácido nucleico similar, el ARN. Ahora, *A* se aparea con *U* (por uracilo, que es, en el ARN, la base correspondiente a la timina del ADN) y *G* con *C*. A continuación, el ARN se traduce en proteína. Cada "codón" (tres bases sucesivas) determina la incorporación de un aminoácido particular a la cadena de proteína (en el esquema, los ocho primeros aminoácidos de la ovoalbúmina). En las bacterias, el ARN que se transcribe directamente del ADN es el mismo que se traduce en proteína. En los organismos superiores hay un paso intermedio que no se especifica aquí: la molécula de ARN precursora, que se fabrica en el núcleo de la célula, se modifica (madura) antes de ser enviada como ARN mensajero al citoplasma. En este paso es donde se eliminan las secuencias correspondientes a los intrones y se unen las correspondientes a los exones.

1872 nucleótidos, de los cuales, 1158 determinan la secuencia de los 386 aminoácidos de la proteína; hay una secuencia "líder", de 64 nucleótidos, en el extremo 5' del ARN, y otra secuencia, de 650, en el extremo 3', ninguna de las cuales se traduce. Copiando el ARN mensajero de la ovoalbúmina (mediante un enzima vírico, la transcriptasa inversa), se obtuvo una cadena complementaria de ADN, que se volvió a copiar a su vez (utilizando una polimerasa del ADN) para formar ADN de doble cadena que era, en efecto, un gen artificial para la ovoalbúmina, fabricado a partir del ARN mensajero. Este ADN complementario de doble cadena se recombinó con un plásmido y se clonó en *E. coli.* De esta forma se disponía de material suficiente con el que preparar un mapa del ADN mediante enzimas de restricción, el primer paso para conocer su estructura.

Para preparar dicho mapa, se tratan diferentes muestras del ADN en cuestión con una batería de restrictasas. Se analizan luego los fragmentos resultantes, para detectar los lugares que cada enzima reconoce específicamente a lo largo de la molécula de ADN [*véase* "Plásmidos", *por* R. P. Novick, Investigación y Ciencia, febrero, 1981]. La distribución de estos puntos de corte ayuda a reconocer un ADN particular y nos advierte de cualquier cambio en su estructura. Descubrimos que el ADN complementario de la ovoalbúmina no se rompía cuando utilizábamos las restrictasas denominadas *Eco*RI y *Hind* III, lo que significaba que nuestro ADN no poseía ninguna de las dos secuencias diferentes, de seis pares de bases, que reconocen esos enzimas.

El siguiente paso fue examinar la estructura del gen de la ovoalbúmina en el propio genoma de gallina, tanto en células del oviducto como en células no especializadas, para compararla con la que se deduce del ARN mensajero. Por entonces, las técnicas de clonación utilizadas para aislar genes, que representan una millonésima parte del genoma total, estaban todavía en sus comienzos. De ahí que decidiéramos analizar primero la estructura del gen de la ovoalbúmina sin aislarlo: identificándolo de entre el genoma de gallina entero. En colaboración con Richard Breathnach, que vino a nuestro laboratorio en calidad de becario postdoctoral, utilizamos los enzimas *Eco*RI y *Hind* III para fragmentar muestras de ADN de células de oviducto y de eritrocitos de gallina (células rojas de la sangre).

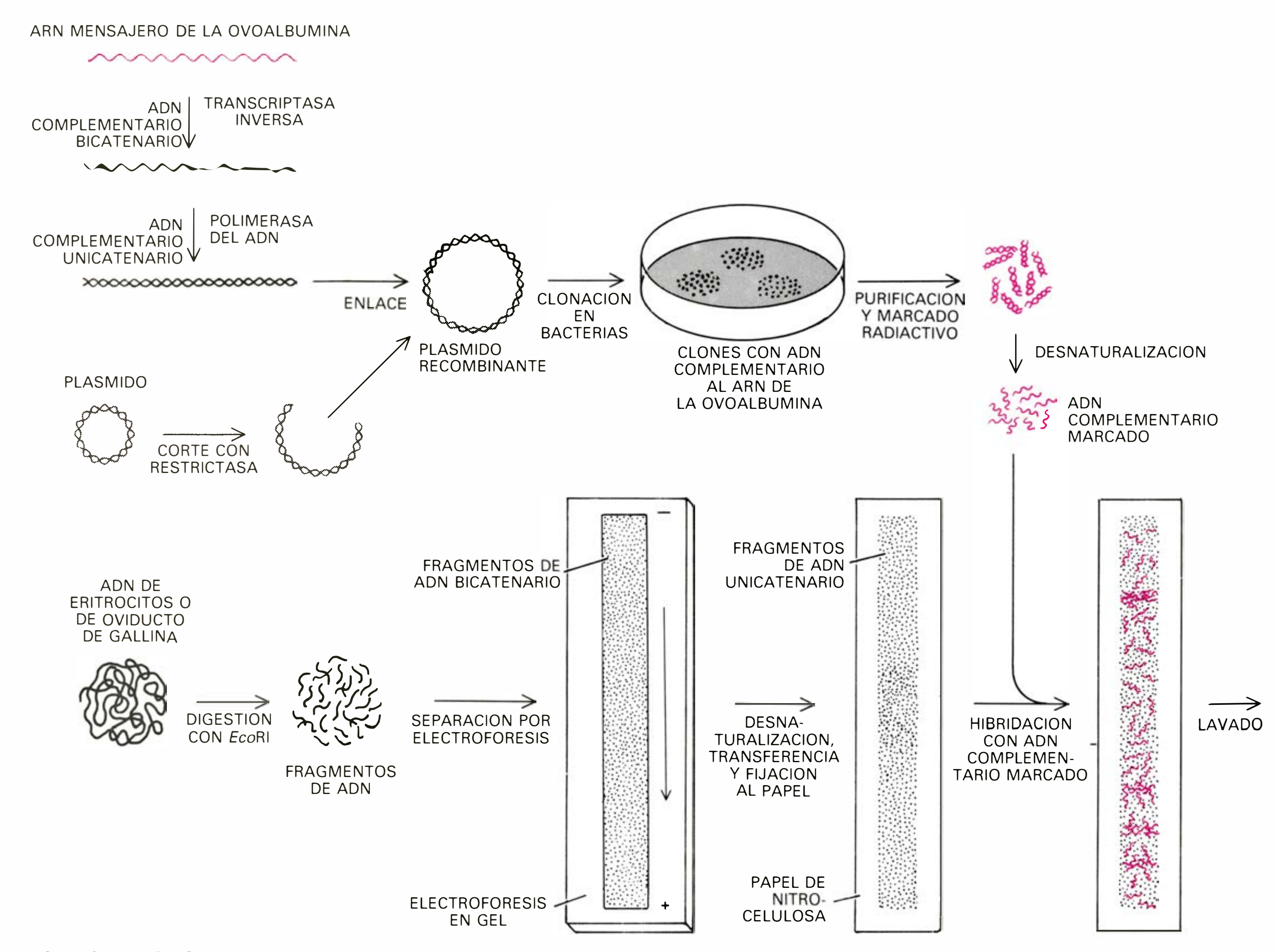


CLONACION MOLECULAR. Consiste en la inserción de un fragmento de ADN extraño en un vector (en este caso un plásmido, un trozo circular de ADN bacteriano), a través del cual pueda introducirse en bacterias, donde se replica. El plásmido y el ADN extraño se cortan con una "restrictasa", enzima que corta el ADN por una secuencia específica de bases, de tal forma que deja extremos unicatenarios y complementarios. Cuando se incuban los fragmentos resultantes con el plásmido, ambos se asocian, al aparearse sus extremos complementarios. Tras la unión, los plásmidos recombinantes se introducen en la bacteria. La colonia bacteriana que contiene un plásmido se identifica por su resistencia a antibióticos; en el caso que aquí se representa sería resistente a la penicilina y sensible a la tetraciclina. A continuación, por hibridación, se identifican aquellas colonias que contienen un fragmento particular de ADN extraño. Las colonias se transfieren a un papel de filtro, se lisan las células, se desnaturaliza su ADN (se separan las cadenas) y se fija al papel in situ. Se añade una molécula "testigo": ARN o ADN, complementario al fragmento buscado (en este caso *a*) y marcado con un isótopo radiactivo. La molécula testigo se asocia con las que tengan secuencias complementarias, formando moléculas híbridas que quedan retenidas en el papel. El resto se elimina a través de lavados sucesivos. Si se coloca entonces una emulsión fotográfica sobre el papel, un punto oscuro en la película permite identificar el clon *a*, que contiene el fragmento *a*.

Suponíamos que, entre los cientos de miles de fragmentos resultantes, alguno contendría intacto el gen de la ovoalbúmina, ya que (de acuerdo con los resultados obtenidos utilizando el ADN complementario) ninguno de los dos enzimas cortaba el gen. El ADN complementario clonado nos serviría de testigo para identificar el gen de la ovoalbúmina. Sometimos los fragmentos de ADN cromosómico a electroforesis en un gel de agarosa para separarlos según su tamaño. Cuando, después de la electroforesis, teñimos el ADN con un colorante fluorescente, apareció una mancha que cubría todo el gel. Aunque los fragmentos se habían separado por tamaños, aparecieron tantas clases que resultaba imposible agrupar los fragmentos por su longitud. ¿Cómo descubrir el gen de la ovoalbúmina dentro de aquella mancha?

Lo logramos aplicando la técnica del "papel secante", inventada por E. M. Southern, de la Universidad de Edimburgo. Los fragmentos del ADN se desnaturalizaron en el gel; luego, se transfirieron y fijaron a un filtro de papel de nitrocelulosa. A continuación, se incubó el filtro con la molécula testigo, el ADN complementario de la ovoalbúmina marcado fuertemente con un isótopo radiactivo. Las moléculas testigo que encontraran secuencias de nucleótidos complementarias en los fragmentos de ADN cromosómico se asociarían con éstas y quedarían unidas al papel; el resto de las moléculas testigo se eliminarían a lo largo de lavados sucesivos. La autorradiografía revelaba la localización de moléculas testigo radiactivas, y por tanto la del ADN cromosómico específico para la ovoalbúmina que se hubiese hibridado con ellas.

Puesto que ni *Eco*RI ni *Hind*III rompían el ADN complementario de la ovoalbúmina, esperábamos que el análisis de los fragmentos originados por cualquiera de los enzimas produjera una sola banda radiactiva, representante de un fragmento genómico que contuviera, completo, el gen de la ovoalbúmina. Cuál no sería nuestra sorpresa al observar varias bandas en la película, con independencia de si los fragmentos habían sido originados por *Eco*RI o *Hind*III. La distribución de las bandas



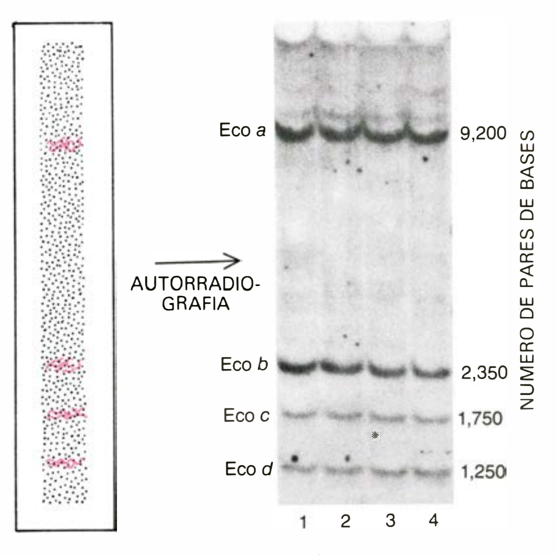
ESTRUCTURA INESPERADA del gen de la ovoalbúmina, puesta de manifiesto en un experimento basado en la técnica del "papel secante". En este experimento, el genoma completo de gallina (todo el ADN de una célula) se cortó con la restrictasa *Eco*RI. Los fragmentos resultantes, separados por tamaños mediante electroforesis, se expusieron a una molécula testigo de ADN, complementaria al ARN mensajero de la ovoalbúmina. Para preparar la molécula testigo, los 1872 nucleótidos del ARN mensajero (*arriba, a la izquierda*) se utilizaron como molde para copiar una cadena complementaria de ADN, mediante el enzima transcriptasa inversa. A partir de esta cadena de ADN se fabricó ADN de doble cadena, que se insertó en el plásmido. El ADN, así recombinado, se clonó en bacterias, se marcó con un isótopo radiactivo y se desnaturalizó. El ADN cromosómico de eritrocitos de gallina o de células de oviducto se cortó con *Eco*RI en unos 500.000 fragmentos, cuyas longitudes oscilaban entre 1000 y 15.000 pares de bases (*abajo, a la izquierda*). Los fragmentos se colocaron en pocillos practicados en el extremo de un gel de agarosa y se separaron por electroforesis; cuanto más pequeños son los fragmentos, más rápidamente emigran hacia el polo positivo. Los fragmentos se desnaturalizaron, transfirieron y fijaron en un papel de filtro mediante la técnica del "papel secante". Se expuso el papel de filtro a las moléculas testigo, que se asociaron a los fragmentos con secuencias complementarias (y,

era la misma, procedieran los fragmentos cromosómicos de células de oviducto o de eritrocitos.

Al informar de nuestros descubrimientos en una reunión de la Organización Europea de Biología Molecular, en la primavera de 1977, nadie pensó que las bandas múltiples indicaran que el gen de la ovoalbúmina del genoma de gallina pudiese estar fragmentado. La opinión más extendida sugería que lo que teníamos delante era un artefacto provocado durante el proceso de transferencia o en la hibridación. Unos meses más tarde, en un simposio celebrado en Cold Spring Harbor, Nueva York, se informó que, en el ADN de algunos virus, las secuencias que corresponden al segmento inicial, que no se traduce, del ARN mensajero están separadas de las secuencias correspondientes al segmento principal, que sí se traduce, de dicho ARN mensajero. Estas noticias nos animaron a pensar que nuestros resultados, lejos de ser un artefacto, podían reflejar alguna inesperada anomalía en la estructura del gen de la ovoalbúmina.

Breathnach, Jean-Louis Mandel y yo comenzamos a cartografiar la secuencia de la ovoalbúmina del genoma de gallina. Tratando el genoma completo con restrictasas que cortaban el ADN complementario y el ADN cromosómico, podríamos comparar los puntos de corte en ambos tipos de ADN. De esta forma encontramos, por ejemplo, que el fragmento cromosómico *Eco*RI que habíamos denominado *b* incluía la secuencia correspondiente a los primeros 500 nucleótidos del ARN mensajero, mientras que la secuencia correspondiente a la última parte de la molécula del mensajero estaba en el fragmento *a*. Seguimos adelante con el estudio detallado del mapa de los lugares de corte de las restrictasas en el gen del genoma de gallina, comparándolo con el correspondiente del ADN complementario, que reflejaba la estructura del ARN mensajero.

A finales del verano nos parecía ya evidente que la secuencia de ADN que determina el ARN mensajero de la ovoalbúmina, en el genoma de gallina, estaba interrumpida por otra secuencia de ADN que no estaba representada en el ARN mensajero. Lo más sorprendente era que, a diferencia de los informes previos referentes al ADN vírico, algunas de las interrupciones ocurrían en el interior de las secuencias de ADN que codificaban para ARN mensajero que se traducía en proteína. En otras palabras, la secuencia del gen que determina la proteína estaba fragmentada. Por aquellas fechas, los grupos dirigidos por R. A. Flavell, de la Universidad de Amsterdam, y Philip Leder, del Instituto Nacional de la Salud Infantil y el Desarrollo Humano, de los Estados Unidos, llegaron a la misma conclusión para el caso del gen que, en conejos y ratones, determina el ARN mensajero de la beta globina (un componente de la molécula de hemoglobina). Susumu Tonegawa, del Instituto de Inmunología de Basilea, observó un fenómeno parecido en algunos genes de las inmunoglobulinas (anticuerpos). N. H. Carey, de los Laboratorios de Investigación G. D. Searle, en Inglaterra, y sus colegas, obtuvieron independientemente resultados que sugerían que el gen de la ovoalbúmina podía estar interrumpido. Resultaba obvio que esta organización fragmentada de los genes estructurales no constituía ninguna rareza en los genomas eucariotas.

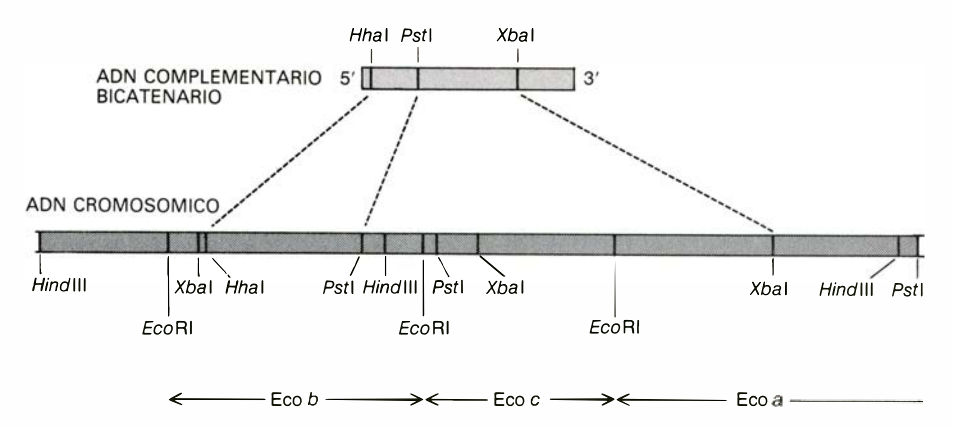


por tanto, complementarios con las del ARN mensajero de la ovoalbúmina). se esperaba que las moléculas testigo se asociaran con la banda que llevase los fragmentos correspondientes al gen de la ovoalbúmina (*Eco*RI no corta el ADN complementario del mensajero de la ovoalbúmina). La autorradiografía reveló, empero, cuatro bandas (*Eco a-d*), no una. Aparecían en la misma posición, tanto si el ADN cromosómico procedía de eritrocitos (*muestras 1* y *2*) como de células de oviducto (*3* y *4*).

La elaboración de mapas de restricción utilizando las técnicas del "papel secante" y de hibridación tenía todavía un poder de resolución demasiado bajo para revelar en detalle la organización de un gen fragmentado. Para lograr un análisis más preciso del gen de la ovoalbúmina teníamos que aislarlo del ADN cromosómico, lo que fue posible gracias a los adelantos en la técnica de clonación molecular. En colaboración con Philippe Kourilsky, del Instituto Pasteur, y sus colegas, clonamos en el fago lambda los fragmentos *Eco*RI del ADN de gallina. Aprovechamos también la existencia de una "biblioteca" de recombinantes de genoma de gallina (una colección de fagos lambda recombinantes que llevaban fragmentos de todo el genoma de gallina), que había sido preparada por Jerry B. Dodgson, del Instituto de Tecnología de California, Judith Strommer, de la Universidad de California en Los Angeles, y James D. Engel, de la Universidad Northwestern. Utilizando ADN complementario de la ovoalbúmina como molécula testigo, aislamos varios clones que contenían el gen de la ovoalbúmina o algunos de sus fragmentos *Eco*RI. Frank Gannon, Jean-Paul Le Pennec, Cochet y Fabienne Perrin desnaturalizaron un ADN recombinante que llevaba, completo, el gen de la ovoalbúmina; lo mezclaron a continuación con ARN mensajero purificado de la ovoalbúmina, en condiciones que favorecían la hibridación del ADN con el ARN e impedían la reasociación de las cadenas de ADN.

Las micrografías de los híbridos resultantes ofrecían una extraordinaria prueba visual de la organización de los genes fragmentados. El ADN (el gen de la ovoalbúmina) se asociaba sólo en parte con el ARN (el mensajero de la ovoalbúmina). Siete regiones de ADN que no hibridaban sobresalían, cual bucles, de la molécula híbrida ADN-ARN, lo que indicaba que no habían "encontrado" nucleótidos complementarios con los que poder hibridarse [*véase la ilustración de la página 23*]. Los siete bucles representan siete segmentos de ADN que interrumpen la secuencia de ADN portadora de la información para fabricar el ARN mensajero de la ovoalbúmina. Estas secuencias intercaladas, o "intrones", dividen el ADN informativo en ocho fragmentos, llamados "exones".

Al examinar las moléculas híbridas con el microscopio electrónico, un intrón formado por menos de 50 pares de bases no se hubiera detectado. Para asegurarnos de que en el gen de la ovoalbúmina no había más interrupciones que los bucles de las fotografías, era preciso comparar toda la secuencia de nucleótidos de los exones con la secuencia del ARN mensajero de la ovoalbúmina. Utilizando el método desarrollado por Allan M. Maxam y Walter Gilbert, de la Universidad de Harvard, secuenciamos el ADN complementario de la ovoalbúmina que habíamos clonado; establecimos así la secuencia completa del mensajero de la ovoalbúmina. A partir de esta secuen-



ESTRUCTURA FRAGMENTADA del gen de la ovoalbúmina; se hizo patente al comparar el mapa de restricción del ADN complementario de doble cadena, obtenido a partir del ARN mensajero (*arriba*), con el mapa del gen de la ovoalbúmina del ADN cromosómico de gallina (*abajo*). Para cartografiarlos, se trataron muestras de ADN con varios enzimas de restricción, por separado y mezclados en diferentes combinaciones, se determinó el tamaño de los fragmentos resultantes y se estableció su ordenación en el ADN, mediante la técnica del "papel secante". El enzima *Eco*RI corta el gen del ADN cromosómico en tres fragmentos (*a, b, c*), pero no corta el ADN complementario, lo que indica que las secuencias que determinan el ARN mensajero deben de estar separadas en el gen cromosómico. La estructura fragmentada del gen se confirmó por la ausencia de cortes de la restrictasa *Hind*III en el ADN complementario y también por comparación de los diferentes puntos de corte en los dos mapas (*líneas discontinuas*).

cia ribonucleica pudimos deducir una secuencia de aminoácidos que se ajustaba muy bien a la que otros investigadores, analizando directamente la proteína (un trabajo mucho más laborioso), habían establecido para la ovoalbúmina. Nuestra secuencia de ARN coincidía también con la que determinaron, cada uno por su cuenta, Bert W. O'Malley, del Baylor College of Medicine, y George G. Brownlee, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Gran Bretaña. Estas coincidencias ponían de manifiesto que la clonación no había introducido errores en la secuencia de nucleótidos o que, si los había, estos eran mínimos. (La correspondencia entre los resultados obtenidos secuenciando la cadena de aminoácidos y secuenciando la de nucleótidos revelaba también que, siempre que fuera posible clonar un gen estructural, la secuenciación del ADN constituía el método más adecuado para llegar a la secuencia de aminoácidos de la proteína codificada por ese ADN.)

Cristophe Benoist, Kevin O'Hare y Breathnach compararon entonces la secuencia del ARN mensajero de la ovoalbúmina con las secuencias de ADN de todos los exones. Encontraron que el primer nucleótido del mensajero estaba situado en el extremo 5' del primer exón (*L*) y que el postrer nucleótido se hallaba en el extremo 3' del último exón (número 7) [*véase la ilustración de la página siguiente*]. Ninguno de los ocho exones presentaba nuevas interrupciones.

¿Qué nos decía todo ello? Lisa y llanamente, que el gen de la ovoalbúmina de gallina (es decir, la región de ADN que contiene todas las secuencias necesarias para fabricar el ARN mensajero) lo formaban ocho exones con un intrón, que carecía de correspondencia en el mensajero, entre exón y exón. El estudio de la secuencia confirmó que el orden de los exones era el mismo en el ADN que en la molécula de ARN mensajero (y, por tanto, que en la secuencia de aminoácidos de la proteína; hasta este punto, pues, la colinearidad, aunque interrumpida, se mantenía). El gen de la ovoalbúmina mide una longitud de unos 7700 pares de bases, desde la región que codifica para el extremo inicial 5' de la molécula de ARN hasta la que codifica para el extremo final, 3'. Esta longitud viene a cuadruplicar la del ARN mensajero final (1872 pares de bases) y a septuplicar la del segmento de mensajero que se traduce a proteína (1158 pares de bases).

Tras haber descubierto un gen fragmentado, nos preguntábamos si este tipo de estructura sufriría modificaciones durante la diferenciación de las células del oviducto, el objetivo inicial de nuestra investigación. Gannon, Perrin y Jean-Marc Jeltsch compararon el gen de la ovoalbúmina, clonado a partir de ADN de oviducto, con el mismo gen clonado a partir de eritrocitos de gallina. No encontraron indicios de que la estructura del gen sufriese algún tipo de reorganización durante la diferenciación, ni siquiera a nivel de secuencia de ADN. Sus resultados coincidían con los obtenidos en otros laboratorios para genes distintos que sólo se expresan en células muy especializadas, como la globina y la fibroína de la seda, una proteína de los gusanos de seda. Sin embargo, Tonegawa, Leder y otros han demostrado de forma concluyente que, durante la diferenciación de los linfocitos (células sanguíneas en las que se expresan los genes de las inmunoglobulinas), los genes fragmentados de las inmunoglobulinas experimentan una reorganización, y que esta reorganización desempeña un papel fundamental en el proceso de generar la enorme diversidad que caracteriza a las inmunoglobulinas.

En mamíferos, aves y anfibios, la mayoría de los genes analizados que portan información para fabricar proteínas están fragmentados. (Entre las excepciones merecen destacarse los genes de las histonas, proteínas asociadas al ADN en el cromosoma, y los genes de los interferones.) Se han encontrado algunos genes fragmentados en insectos y en eucariotas inferiores, como las levaduras, pero este tipo de organización génica parece más frecuente en organismos superiores. Se ha sugerido que esta estructura fragmentada puede ser propia de los genes que determinan proteínas sintetizadas sólo en células muy especializadas. Tales genes fueron los primeros que se examinaron (fundamentalmente por razones técnicas). Acaba de comprobarse, no obstante, que algunos genes "domésticos" –los que se requieren para las tareas diarias de toda célula– están también fragmentados. En general, los intrones de los genes fragmentados son más largos que los exones. No parece haber reglas que limiten el tamaño de un intrón, o el número de intrones compatible con una longitud determinada de la molécula de ARN mensajero. Se han encontrado algunos de varios miles de pares de bases; y nosotros hemos contado hasta 16 intrones en el gen que determina la proteína ovotransferrina en gallinas. Por su parte, Robert T. Schimke, de la Universidad de Stanford, ha descubierto en ratones un gen 20 veces más largo que su ARN mensajero.

La organización en genes fragmentados no se limita sólo a los codificadores de proteínas. El honor de su hallazgo hay que concedérselo a David S. Hogness, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, quien la descubrió en los genes de los ARN ribosómicos de la mosca *Drosophila*. (El ARN ribosómico es un componente de los ribosomas, la estructura celular en la que el ARN mensajero se traduce a

proteína.) Algunos genes que codifican para ARN de transferencia, un tercer tipo de ARN, que participa en la traducción, también están fragmentados, aunque sus intrones son muy pequeños.

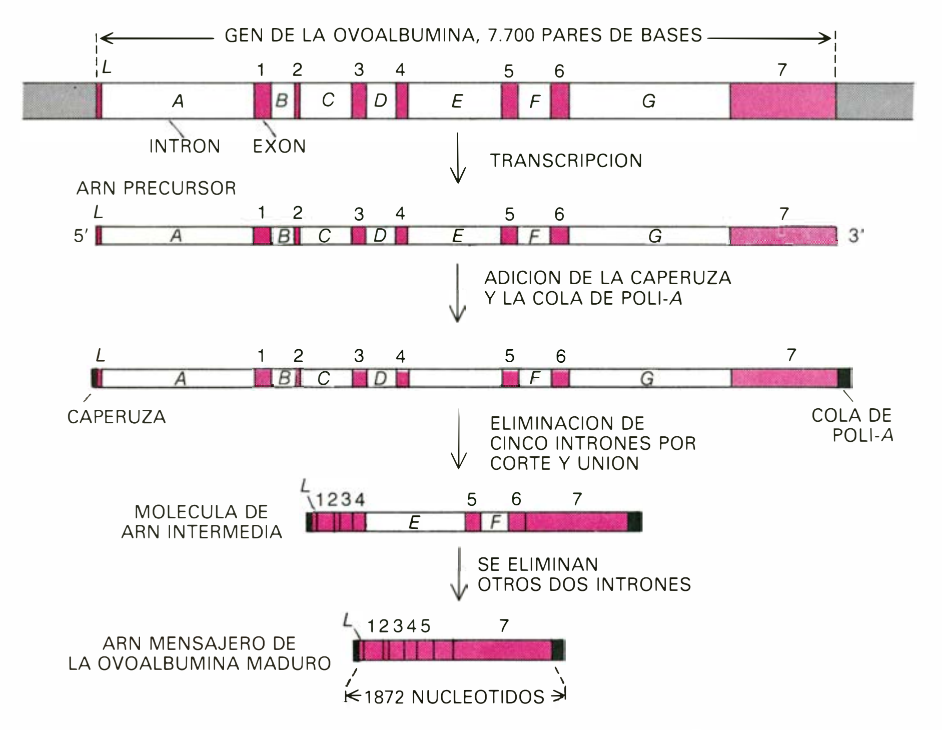
¿Cómo se forma un ARN mensajero, único y sin solución de continuidad, a partir de un gen fragmentado? Pueden imaginarse varios mecanismos. El hecho de que las moléculas de ARN mensajero que se observan en el núcleo sean más largas que los correspondientes ARN mensajeros citoplásmicos induce a pensar que el enzima polimerasa del ADN transcribe primero una molécula precursora, continua, colineal y que incluye todo el gen, con intrones y exones. Inmediatamente, se eliminan de esta molécula de ARN precursora las secuencias correspondientes a los intrones, y las secuencias correspondientes a los exones se unen para formar la molécula "madura" de ARN mensajero. La existencia de este mecanismo de cortar y unir moléculas de ARN recibió apoyo experimental por primera vez en los análisis de las moléculas de ARN precursoras del gen de la beta globina y de ciertos genes de los Padenovirus. (Estos virus aprovechan la maquinaria de las células para realizar su propia transcripción.) Es de presumir que ese mecanismo valga para todos los genes fragmentados que determinan proteínas.

En el caso del gen de la ovoalbúmina era de esperar que la molécula precursora tuviera unos 7700 nucleótidos, que es la longitud total, intrones y exones incluidos. O'Malley y nosotros encontramos exactamente este tipo de moléculas de ARN en el núcleo (y ninguna más larga). La secuencia del gen de la ovoalbúmina y esta molécula precursora podían superponerse perfectamente. También hallamos en el núcleo otras moléculas de ARN de longitudes intermedias entre la molécula precursora y el ARN mensajero final, lo que sugería la existencia de varios pasos en el proceso de maduración, cada uno de los cuales originaría moléculas intermedias de longitud menguante.

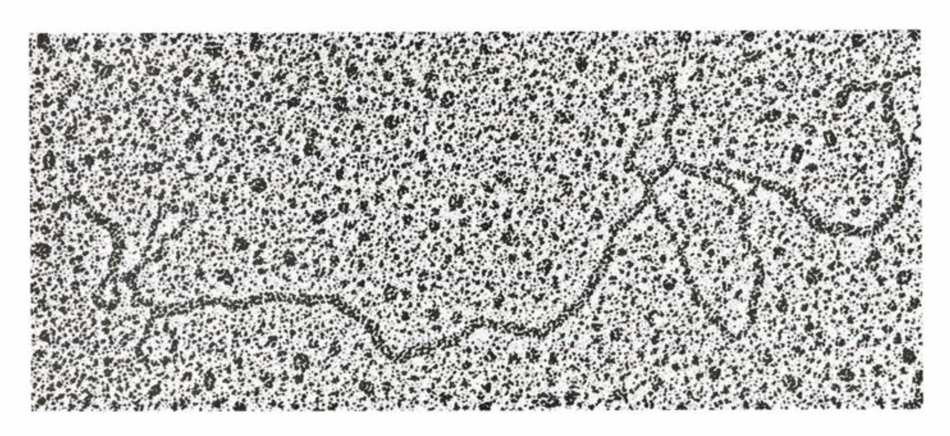
Hibridamos ARN nuclear con el gen de la ovoalbúmina clonado al objeto de examinar la estructura de dichas moléculas intermedias. En una de las fotografías tomadas al microscopio electrónico [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*], la molécula intermedia es claramente un ARN del que se han eliminado las secuencias corres-

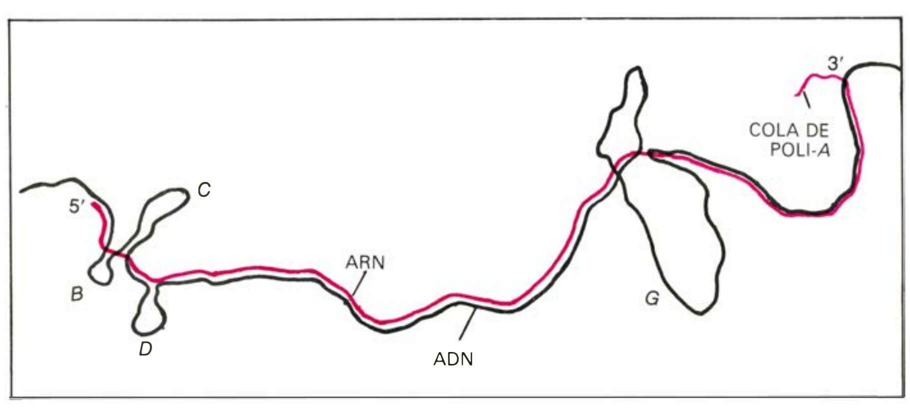
CAPERUZA, EXON *L* (LIDER) ⟶ EXON 1 ⟶
5'——mGACAUACAGCUAGAAAGCUGUAUUGCCUUUAGCACUCAAGCUCAAAAGACAACUCAGAGUUCACCAUGGGCUCCAUCGGCGCAGCAAGCAU
1 10 30 50 70 90
GGAAUUUUGUUUUGAUGUAUUCAAGGAGCUCAAAGUCCACCAUGCCAAUGAGAACAUCUUCUACUGCCCCAUUGCCAUCAUGUCAGCUCUAGCCAUGGUA
110 130 150 170 190
EXON 2 ⟶ EXON 3 ⟶
UACCUGGGUGCAAAAGACAGCACCAGGACACAGAUAAAUAAGGUUGUUCGCUUUGAUAAACUUCCAGGAUUCGGAGACAGUAUUGAAGCUCAGUGUGGCA
210 230 250 270 290
CAUCUGUAAACGUUCACUCUUCACUUAGAGACAUCCUCAACCAAAUCACCAAACCAAAUGAUGUUUAUUCGUUCAGCCUUGCCAGUAGACUUUAUGCUGA
310 330 350 370 390
EXON 4 ⟶
AGAGAGAUACCCAAUCCUGCCAGAAUACUUGCAGUGUGUGAAGGAACUGUAUAGAGGAGGCUUGGAACCUAUCAACUUUCAAACAGCUGCAGAUCAAGCC
410 430 450 470 490
EXON 5 ⟶
AGAGAGCUCAUCAAUUCCUGGGUAGAAAGUCAGACAAAUGGAAUUAUCAGAAAUGUCCUUCAGCCAAGCUCCGUGGAUUCUCAAACUGCAAUGGUUCUGG
510 530 550 570 590
EXON 6 ⟶
UUAAUGCCAUUGUCUUCAAAGGACUGUGGGAGAAAACAUUUAAGGAUGAAGACACACAAGCAAUGCCUUUCAGAGUGACUGAGCAAGAAAGCAAACCUGU
610 630 650 670 690
GCAGAUGAUGUACCAGAUUGGUUUAUUUAGAGUGGCAUCAAUGGCUUCUGAGAAAAUGAAGAUCCUGGAGCUUCCAUUUGCCAGUGGGACAAUGAGCAUG
710 730 750 770 790
EXON 7 ⟶
UUGGUGCUGUUGCCUGAUGAAGUCUCAGGCCUUGAGCAGCUUGAGAGUAUAAUCAACUUUGAAAAACUGACUGAAUGGACCAGUUCUAAUGUUAUGGAAG
810 830 850 870 890
AGAGGAAGAUCAAAGUGUACUUACCUCGCAUGAAGAUGGAGGAAAAAUACAACCUCACAUCUGUCUUAAUGGCUAUGGGCAUUACUGACGUGUUUAGCUC
910 930 950 970 990
UUCAGCCAAUCUGUCUGGCAUCUCCUCAGCAGAGAGCCUGAAGAUAUCUCAAGCUGUCCAUGCAGCACAUGCAGAAAUCAAUGAAGCAGGCAGAGAGGUG
1,010 1,030 1,050 1,070 1,090
GUAGGGUCAGCAGAGGCUGGAGUGGAUGCUGCAAGCGUCUCUGAAGAAUUUAGGGCUGACCAUCCAUUCCUCUUCUGUAUCAAGCACAUCGCAACCAACG
1,110 1,130 1,150 1,170 1,190
CCGUUCUCUUCUUUGGCAGAUGUGUUUCCCCUUAAAAAGAAGAAAGCUGAAAAACUCUGUCCCUUCCAACAAGACCCAGAGCACUGUAGUAUCAGGGGUA
1,210 1,230 1,250 1,270 1,290
AAAUGAAAAGUAUGUUCUCUGCUGCAUCCAGACUUCAUAAAAGCUGGAGCUUAAUCUAGAAAAAAAAUCAGAAAGAAAUUACACUGUGAGAACAGGUGCA
1,310 1,330 1,350 1,370 1,390
AUUCACUUUUCCUUUACACAGAGUAAUACUGGUAACUCAUGGAUGAAGGCUUAAGGGAAUGAAAUUGGACUCACAGUACUGAGUCAUCACACUGAAAAAU
1,410 1,430 1,450 1,470 1,490
GCAACCUGAUACAUCAGCAGAAGGUUUAUGGGGGAAAAAUGCAGCCUUCCAAUUAAGCCAGAUAUCUGUAUGACCAAGCUGCUCCAGAAUUAGUCACUCA
1,510 1,530 1,550 1,570 1,590
AAAUCUCUCAGAUUAAAUUAUCAACUGUCACCAACCAUUCCUAUGCUGACAAGGCAAUUGCUUGUUCUCUGUGUUCCUGAUACUACAAGGCUCUUCCUGA
1,610 1,630 1,650 1,670 1,690
CUUCCUAAAGAUGCAUUAUAAAAAUCUUAUAAUUCACAUUUCUCCCUAAACUUUGACUCAAUCAUGGUAUGUUGGCAAAUAUGGUAUAUUACUAUUCAAA
1,710 1,730 1,750 1,770 1,790
UUGUUUUCCUUGUACCCAUAUGUAAUGGGUCUUGUGAAUGUGCUCUUUUGUUCCUUUAAUCAUAAUAAAAACAUGUUUAAGC—POLI-A
1,810 1,830 1,850 1,870

SECUENCIA DE BASES de los 1872 nucleótidos del ARN mensajero de la ovoalbúmina (equivalente a los exones del gen cromosómico), con el nucleótido metilado en el extremo 5' ("caperuza"), y la cola de poli-*A*, en el 3'. Los codones *AUG* y *UAA* constituyen, respectivamente, las señales para la iniciación y terminación de la traducción. El ARN que determina los 386 aminoácidos de la ovoalbúmina está flanqueado por ARN mensajero que no se traduce.



MADURACION DEL ARN MENSAJERO. Se trata de un proceso secuencial. En primer lugar, se transcribe entero el gen de la ovoalbúmina en una molécula de ARN precursora. A ésta se le añade la "caperuza" (nucleótido metilado) en el extremo 5', y la cola de poli-*A*, en el 3'. Sucesivamente, se van eliminando las secuencias correspondientes a los intrones, a la vez que se van uniendo los exones vecinos. En la figura se esquematiza una molécula intermedia, de la que se han eliminado cinco de los siete intrones. El proceso ocurre en el núcleo; en cuanto termina, el ARNm maduro pasa al citoplasma.



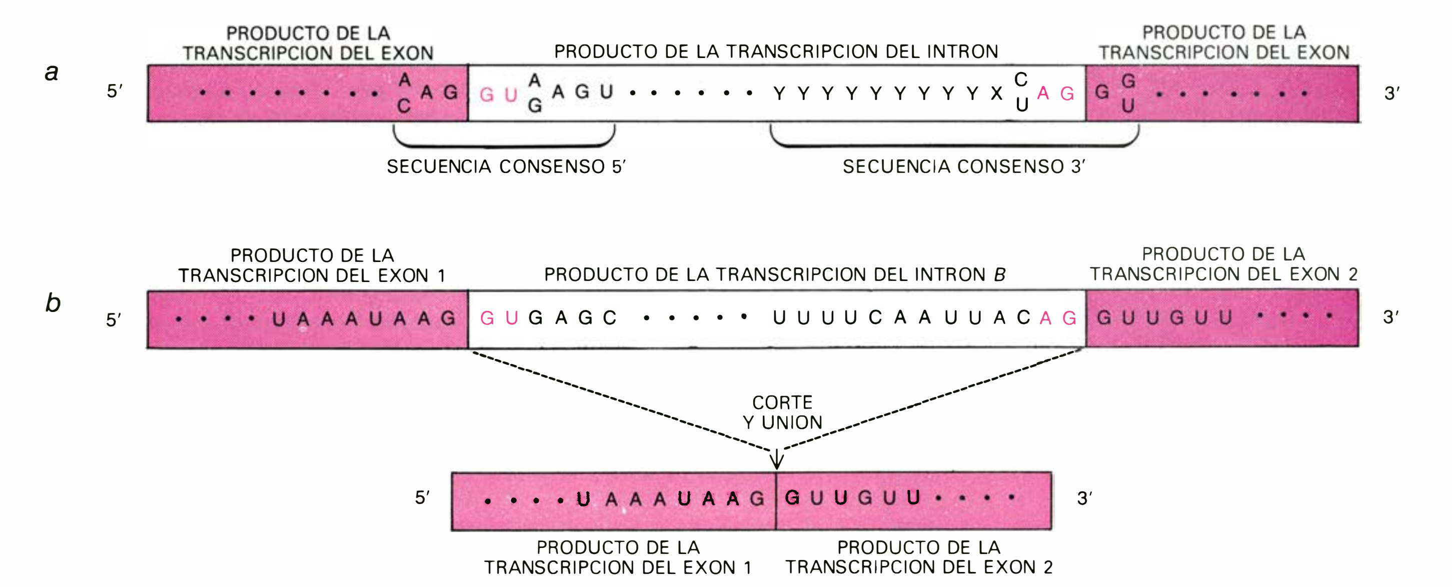


ETAPA INTERMEDIA EN LA MADURACION del ARN mensajero. La molécula que se observa en la electromicrografía (*arriba*) ha sido ampliada unas 180.000 veces; en bosquejo, en la ilustración inferior. La molécula es un híbrido formado por una cadena de ADN del gen de la ovoalbúmina clonado (*negro*) y una molécula de ARN parcialmente procesada (*color*). Los bucles *B, C, D* y *G* son segmentos unicatenarios del gen, correspondientes a los cuatro intrones que ya han sido eliminados del ARN. Los segmentos de línea más gruesa son cadenas híbridas formadas por la asociación del ADN con las secuencias de ARN correspondientes a los exones y a los intrones *E* y *F*, no eliminados todavía. Se ha eliminado también el intrón *A*, pero no se observa el bucle correspondiente porque el exón *L* es muy pequeño y, su híbrido, inestable.

pondientes a los intrones *A, B, C, D,* y *G;* permanecen todavía, en cambio, las correspondientes a los intrones *E* y *F*. Hay indicios de que el proceso de corte y unión tiene lugar principalmente (si no exclusivamente) una vez modificada la molécula precursora por adición de una guanina metilada en el extremo 5' ("caperuza") y una cola de adeninas en el extremo 3' (poli-*A*). Estas modificaciones son características de las moléculas de ARN mensajero. Según parece, todos estos acontecimientos ocurren en el núcleo; en el citoplasma no se han encontrado ni moléculas precursoras ni intermedias.

¿De qué forma se lleva a cabo el proceso de corte y unión? Debe de haber, al menos, un enzima que reconozca los puntos donde cortar. Además, los cortes tienen que ser muy precisos, pues la pérdida de un solo nucleótido podría originar un ARN mensajero sin sentido, al cambiar la composición de los codones y, por ende, la "fase de lectura". Suponiendo que el enzima debe reconocer ciertas secuencias de bases en los sitios donde se unen intrones y exones, examinamos detalladamente dichas uniones en el gen de la ovoalbúmina. Descubrimos varias similitudes en la secuencia realmente sorprendentes. La transcripción de los intrones comienza con la secuencia *GU* (*GT* en la cadena correspondiente de ADN) y acaba con *AG*. Ocurre así, no sólo para la ovoalbúmina, sino también para todas las 90 uniones intron-exón secuenciadas hasta ahora en genes eucariotas. En la mayoría de los casos, aunque no en todos, la región cercana a los sitios de unión presenta una secuencia que se ajusta a la denominada secuencia "consenso".

Probablemente, la especificidad del mecanismo de corte y unión no se deba sólo a la presencia de esas secuencias fijas de dos nucleótidos y la secuencia "consenso". La información aportada por esas secuencias quizá se complete con algún rasgo estructural, como pueda ser una conformación particular de la molécula de ARN. La molécula transcrita está asociada con proteínas que pueden, de alguna forma, contribuir a la especificidad del mecanismo en cuestión. Quizá colabore en el proceso alguna molécula pequeña de ARN, con secuencias complementarias a la secuencia consenso, que permita unirlas. En cualquier caso, la generalidad de la regla *GU-AG* y la presencia de la secuencia consenso revelan que todos los enzimas que participan en el proceso de maduración del ARN mensajero, en los organismos eucariotas ac-



SE HAN SECUENCIADO LAS UNIONES intrón-exón en 90 intrones, pertenecientes a varios genes diferentes. En la ilustración se representan las secuencias más frecuentes (*a*). Todos los productos de la transcripción de intrones examinados empiezan con *GU* y terminan con *AG;* en la mayoría de los casos, aunque no en todos, se encuentran, además, secuencias "consenso". En el esquema, se han colocado dos bases en aquellos puntos en los que dichas bases se presentan, aproximadamente, con la misma frecuencia; *Y* significa *C* o *U*, y *X*, cualquiera base. El intrón de *b* (*en blanco*) es el *B* de la ovoalbúmina.

tuales, han evolucionado a partir de un mismo enzima ancestral. La universalidad de la relación enzima-ARN se ve reflejada en el hecho de que si, en un cultivo de células de ratón, introducimos las moléculas precursoras del ARN mensajero de la ovoalbúmina, éstas son procesadas correctamente por la propia maquinaria del ratón. La regla *GT-AG* no se aplica, sin embargo, al caso de los genes para los ARN de transferencia y ribosómicos. Parece que cada una de las tres clases de ARN tiene sus propios enzimas específicos para realizar la operación de corte y unión.

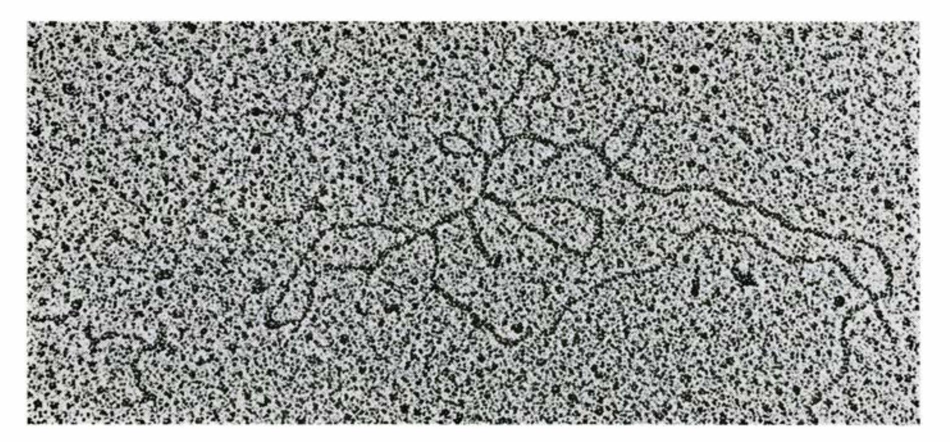
En colaboración con el grupo de Kourilsky, averiguamos que el gen de la ovoalbúmina formaba parte de una familia de tres genes similares, estrechamente asociados. La primera indicación de esta asociación la obtuvo Axel Garapin, del grupo de Kourilsky, cuando clonaba el gen de la ovoalbúmina. Aisló un clon, al que llamó *X*, que se hibridaba muy débilmente con el ADN complementario de la ovoalbúmina utilizada como molécula testigo. En nuestro laboratorio, Mandel y otros demostraron que el clon *X* llevaba un fragmento de un gen similar al de la ovoalbúmina. Para explorar las zonas adyacentes al gen de la ovoalbúmina, recurrimos a un nuevo tipo de vector para la clonación, llamado "cósmido", construido por John Collins, de la Sociedad para la Investigación Biotecnológica, de Alemania Occidental, y Barbara Hohn, de la Universidad de Basilea. Los cósmidos, que reúnen algunas de las propiedades de los plásmidos y del fago lambda, permiten trabajar con clones que contengan moléculas muy largas de ADN recombinante. Las microfotografías de los híbridos formados al asociarse el ADN de uno de dichos clones con la totalidad del ARN mensajero de las células del oviducto de gallina muestran un fragmento del genoma de gallina, de unos 40.000 pares de bases, que no sólo contiene el gen de la ovoalbúmina, sino también otros dos genes. Uno de ellos era idéntico al gen *X;* al otro lo llamamos *Y*.

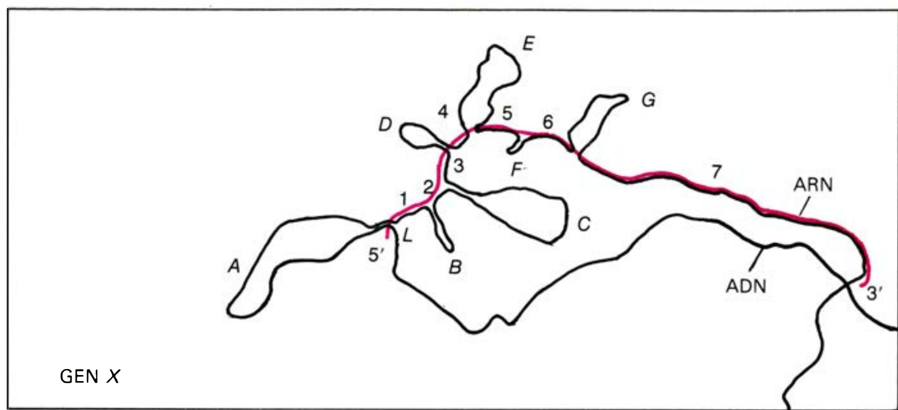
Posteriores análisis de microscopía electrónica y secuenciación de ADN revelaron que tanto *X* como *Y* estaban fragmentados en ocho exones, cuyas longitudes y secuencias se asemejaban a las de los ocho exones del gen de la ovoalbúmina. Por el contrario, aunque el número y posición de los intrones era idéntico en los tres genes, sus longitudes y secuencias variaban de uno a otro; sólo se conservaban las típicas secuencias consenso. No había duda de que los genes *X, Y* y de la ovoalbúmina procedían, por duplicación, de un único gen ancestral, dotado de la misma estructura octoexónica. Considerando el número de diferencias en las tres secuencias y la tasa usual de mutación, hemos calculado que *X, Y* y el gen de la ovoalbúmina proceden de una duplicación ocurrida hace unos 50 millones de años. La familia de los genes de la globina, exhaustivamente estudiada en otros laboratorios, constituye otro ejemplo de la sorprendente conservación de la estructura tipo exón-intrón a lo largo de la evolución. Las secuencias de los genes de la alfa y beta globinas, cuya separación por duplicación parece que ocurrió hace unos 500 millones de años, están interrumpidas por dos intrones con idéntica localización en los dos genes.

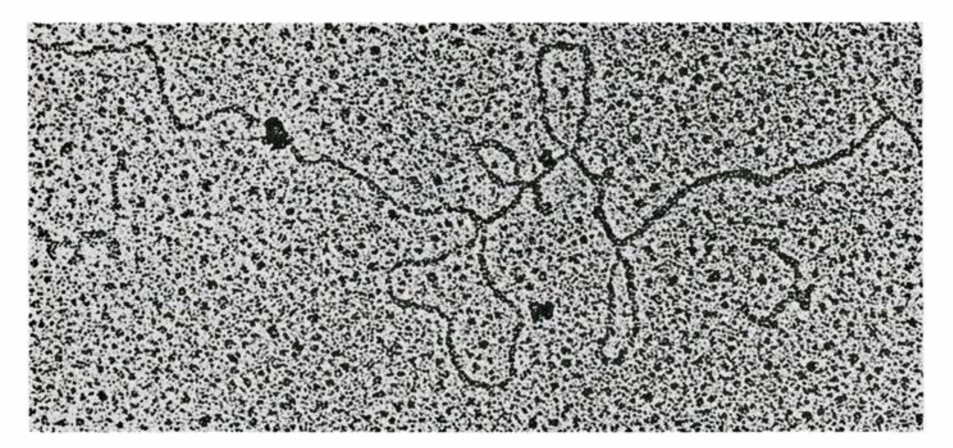
De todos los datos evolutivos comparativos disponibles se desprende que las secuencias de los exones evolucionan de forma lenta, principalmente por mutaciones puntuales en las que una base sustituye a otra, mientras que las secuencias de los intrones evolucionan más rápidamente, por inserciones y deleciones, de longitud variable. Las inserciones y deleciones tienden, probablemente, a ser eliminadas por selección natural en los exones. En otras palabras, los genes fragmentados son, con toda verosimilitud, combinaciones de elementos muy estables, portadores de información para fabricar proteínas y rodeados de zonas de ADN en continuo cambio.

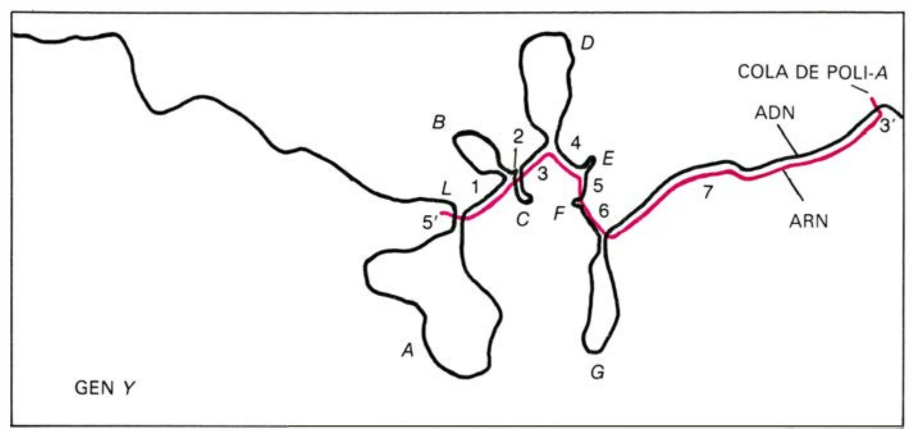
Dichas zonas de ADN representan una fracción considerable de la región de la ovoalbúmina en el genoma de gallina. Según parece, del fragmento de 40.000 pares de bases que incluye los genes *X, Y* y de la ovoalbúmina, sólo un nueve por ciento lleva información para fabricar proteínas. Si todo el genoma de gallina y el de los demás organismos eucariotas superiores poseen una organización similar, se explicaría al menos una parte considerable de las discrepancias observadas entre el tama ño del genoma y el número de genes.

Dije antes que, en el caso del gen de la ovoalbúmina y de otros, no había pruebas de que la organización en ge-







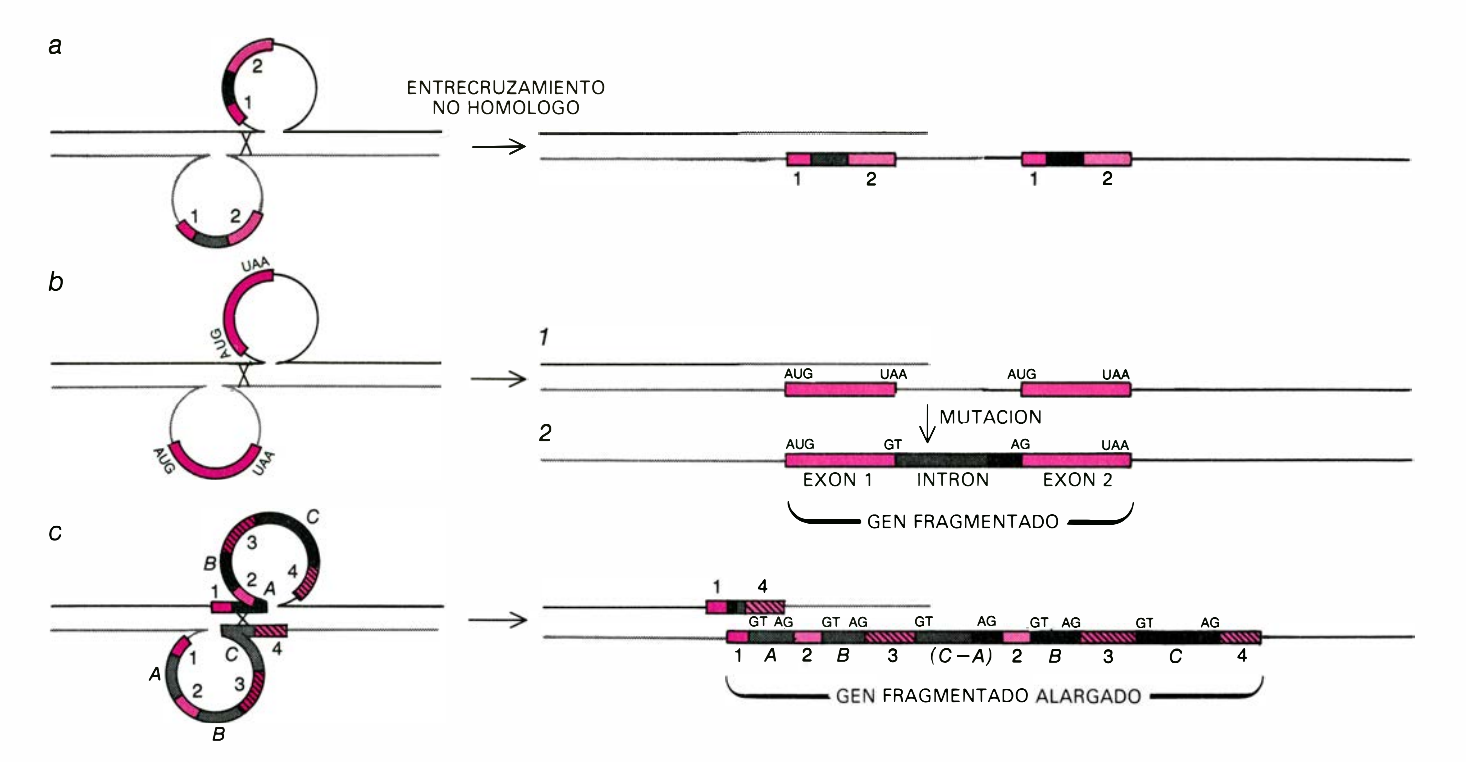


FAMILIA DEL GEN DE LA OVOALBUMINA, que incluye, además del propio de la ovoalbúmina, los genes adyacentes *X* e *Y*. Las electromicrografías y sus esquemas correspondientes ponen de manifiesto las estructuras de *X* (*arriba*) e *Y* (*abajo*), que pueden compararse con la del gen de la ovoalbúmina (*véase la ilustración de la página 23*). En ambos casos, las secuencias de los exones se han asociado con sus correspondientes en el ARN mensajero, mientras que las secuencias intrónicas forman bucles. Al igual que el gen de la ovoalbúmina, *X* e *Y* tienen ocho exones (*L, 1-7*) y siete intrones; los exones homólogos miden la misma longitud en los tres casos, mientras que la longitud de los intrones varía de uno a otro. Las moléculas de las fotografías, tomadas por Pierre Chambon, han sido aumentadas unas 120.000 veces.

nes fragmentados interviniera en la diferenciación mediante reorganizaciones del gen, al revés de lo que parecía ocurrir en el caso de los genes de las inmunoglobulinas. ¿Hay otras maneras por las que la presencia de intrones desempeñe alguna función en la regulación génica? La persistencia de la regla *GU-AG* hace poco probable que la expresión génica esté controlada por la presencia o ausencia de los diversos enzimas que intervienen en el mecanismo de corte y unión. Quizá la maquinaria implicada en todo ese mecanismo sea, no obstante, más compleja de lo que parece. Posiblemente haya un solo enzima común a todas las células y especies, amén de algunos elementos más específicos –una proteína o un ARN colaborador pequeño– que modifiquen selectivamente el ritmo de corte y unión. De todos modos, habrá que purificar toda la maquinaria implicada en el proceso si queremos ahondar más en esa dirección.

El mecanismo de corte y unión no parece limitarse a eliminar las secuencias correspondientes a los intrones; quizá se trate de una condición para estabilizar el ARN y para su transferencia del núcleo al citoplasma. Varios grupos de investigadores de los Estados Unidos han demostrado que no se produce ARN mensajero estable si, antes de la infección con el virus SV40, se elimina del genoma de éste un intrón de un gen determinado. No se diría que importe tanto la secuencia completa del intrón, cuanto las secuencias que están en las uniones exón-intrón o en su vecindad. Al parecer, lo relevante es que tenga lugar la acción de corte y unión, no que el intrón posea una determinada secuencia. Una posibilidad es que la maquinaria necesaria para cortar y unir esté situada en la membrana nuclear, de forma que sólo aquellos ARN que han madurado puedan pasar al citoplasma a través de la membrana. De esta hipótesis, sin embargo, deriva una nueva dificultad: no todos los genes que determinan proteínas, en eucariotas, están fragmentados. Es más, si bastara un solo suceso de corte y unión para asegurar la fabricación de un ARN estable, podría suponerse que la mayoría de los intrones no desempeñan ningún papel en el proceso.

No hay pruebas de que el ARN que originalmente se transcribe a partir del gen de la ovoalbúmina, o de los otros genes que se han estudiado hasta ahora (excepto quizás algunos genes de las inmunoglobulinas), pueda procesarse de formas distintas y originar así ARN



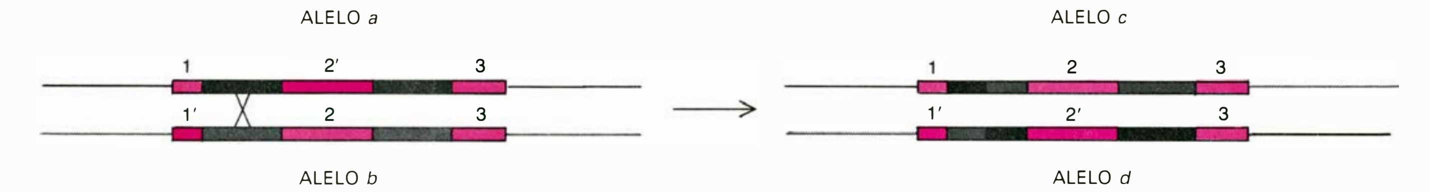
EL CRUZAMIENTO NO HOMOLOGO origina genes fragmentados por duplicación de genes. El entrecruzamiento es un proceso que permite el intercambio de segmentos de ADN cromosómico entre dos cromátidas de un par de cromosomas. Este proceso tiene lugar durante la meiosis, en la maduración de las células germinales. Las duplicaciones "discretas" (*a*) pueden originar dos genes fragmentados, a partir de un gen fragmentado ancestral con dos exones (*1* y *2*). (El entrecruzamiento homólogo mezcla alelos, o variantes de un mismo gen, y favorece la diversidad genética.) El entrecruzamiento no homólogo entre secuencias adyacentes al gen y mal alineadas da lugar a un cromosoma con ambos genes y a otro que no lleva ninguno. A partir de un gen ancestral no fragmentado se puede originar otro, fragmentado, con dos exones, si se "fusionan" después de la duplicación (*b*). En primer lugar, el entrecruzamiento no homólogo produce la duplicación del gen (*1*); luego, las "unidades de transcripción" de los genes duplicados se fusionan (*2*): por mutación se eliminan las señales de iniciación (*AUG*) y de terminación (*UAA*), y se generan las señales de corte y unión, *GT* y *AG*. Mediante entrecruzamiento no homólogo entre intrones de un gen con cuatro exones (*1-4*) y tres intrones (*A-C*) se puede originar un gen fragmentado con seis exones y cinco intrones.

mensajeros que determinan proteínas diferentes. Sin embargo, en los virus de ADN hay casos bien definidos en que se obtienen varias proteínas diferentes a partir de una región determinada del genoma, según se procese la molécula precursora de ARN mensajero. Secuencias de ARN que se eliminan en un ARN mensajero, se conservan en otro; secuencias intrónicas se convierten en exónicas, y viceversa, tras un reajuste entre sus uniones. F. H. C. Crick, del Instituto Salk de Investigación Biológica, ha señalado que una tal multiplicidad de posibilidades en el mecanismo de cortar y unir se presenta casi exclusivamente en los virus, que no disponen de reservas suficientes de ADN, y es probable que sea muy raro en los genes cromosómicos de las células eucariotas, que no están limitadas en este sentido. Gilbert y Tonegawa, por otra parte, han sugerido que tal variedad de posibilidades puede incidir en la evolución, pues permite la síntesis de un nuevo producto génico conservando, al mismo tiempo, el antiguo.

¿Puede acaso ocurrir que un intrón sea, alguna vez, un gen dentro de otro gen? No se tiene noticia de ese hecho por lo que respecta a los genes cromosómicos. Sin embargo, Piotr P. Slonimski y sus colegas, del Centro de Genética Molecular de Gif-sur-Yvette, han observado que intrones así pueden existir en las mitocondrias de levaduras (las mitocondrias son unas estructuras celulares que tienen su propia maquinaria genética). Algunas mutaciones localizadas en un intrón del gen para el citocromo *b* de las mitocondrias afectan al proceso de maduración del ARN que se transcribe a partir de dicho gen. Da la impresión de que, antes de ser eliminado, el intrón, o parte de él, determinara la síntesis de una pequeña proteína con alguna misión en el proceso de maduración de la molécula precursora completa. En otras palabras, algunos intrones pueden participar en la regulación del proceso de maduración de su propia molécula. Queda por ver si esto es sólo una peculiaridad de algunos genes de las mitocondrias que, como los virus, tienen una cantidad limitada de ADN.

Resta todavía dilucidar cómo surgieron a lo largo del proceso de la evolución, los genes fragmentados y el mecanismo de maduración. La vía más probable de aparición sería a través de esa especie de "mezcla de genes" conocida por entrecruzamiento no homólogo. La forma normal de entrecruzamiento (homóloga) es un hecho frecuente durante la meiosis, una etapa de la reproducción sexual. Los dos componentes de un par de cromosomas homólogos se alinean, se rompen por el mismo sitio e intercambian segmentos homólogos (segmentos que tienen la misma función genética y aproximadamente la misma secuencia de ADN), los cuales se "recombinan" por apareamiento de sus bases complementarias. El entrecruzamiento homólogo mezcla alelos, variantes de un mismo gen, y, por tanto, favorece la diversidad genética. En los entrecruzamientos no homólogos, un fenómeno mucho más raro, los cromosomas no se alinean de forma correcta; segmentos no homólogos se entrecruzan y recombinan mediante un mecanismo de recombinación "ilegítima", todavía no aclarado, dando lugar a reorganizaciones del ADN mucho más radicales, entre ellas, duplicaciones de genes.

Muchos estudiosos de la evolución a nivel molecular creen que la duplicación de genes, producto de entrecruzamientos no homólogos, ha desempeñado un papel fundamental en la evolución. Proponen que la mayoría de los genes actuales han evolucionado por



INTRONES Y EVOLUCION. La presencia de aquellos puede resultar beneficiosa en el curso evolutivo: al aumentar la separación entre los exones, incrementa la posibilidad de que las mutaciones ventajosas que afecten a exones diferentes de dos alelos distintos (versiones diferentes de un gen) se unan para formar un gen doblemente ventajoso. A la izquierda, se representan dos alelos de un gen, cuyos exones 1' y 2' han sufrido mutaciones y ahora determinan una proteína más eficiente. La recombinación entre secuencias homólogas de un intrón origina un nuevo alelo (*d*) que parte ahora los dos exones.

duplicaciones de unos pocos genes ancestrales, de suerte que el grueso de las proteínas actuales descendería de unas cuantas primordiales. Las duplicaciones "discretas" originan dos genes separados, aunque idénticos. Mutaciones en una cualquiera de las copias pueden dar lugar a una nueva proteína, mientras que la otra copia continúa determinando la proteína original; de esta forma se amplía el repertorio de proteínas de un organismo. En las duplicaciones "fusionadas" o contiguas, los segmentos correspondientes a una duplicación completa o parcial del gen original se combinan para constituir un único gen alargado que determina una nueva proteína.

El examen de las familias multigénicas no deja lugar a dudas de que las duplicaciones discretas de genes ancestrales que ya estaban fragmentados de igual o parecida forma pueden ser el origen de muchos de los genes fragmentados actuales. Las duplicaciones también pueden explicar el origen de los propios genes fragmentados ancestrales. Tonegawa y sus colegas, observando que ciertas regiones funcionalmente homólogas en algunas inmunoglobulinas están determinadas por una serie de exones homólogos, han propuesto que los intrones se originaron mediante una serie de entrecruzamientos. Según ellos, el hecho inicial fue la duplicación de un único gen primordial continuo y algún ADN vecino (extragénico). El resultado inicial habría sido la formación de dos copias del gen original, separadas por un trozo de ADN. Las dos "unidades de transcripción" de aquellas copias pudieron, más tarde, fusionarse, de tal suerte que, ahora, formasen una sola unidad de transcripción que comprendiera los genes duplicados y el ADN intercalado, esto es, un intrón separando a dos secuencias que codifican para proteínas. El segmento del ARN correspondiente a esta secuencia intercalada podría eliminarse, posteriormente, resultando un nuevo ARN mensajero, unas dos veces más largo que el gen primordial, que determinaría una nueva proteína con dos regiones homólogas. Esto implica que las señales de corte y unión estaban ya presentes en los extremos del gen primordial, o bien se originaron por mutación, después de la duplicación, en los extremos del ADN intercalado.

La ventaja evolutiva del mecanismo de corte y unión es clara. Podrían formarse nuevos genes que codificaran proteínas más largas, mediante la fusión de unidades de transcripción duplicadas; y ello con más facilidad que a través de un mecanismo menos frecuente: la deleción exacta del ADN que separa las copias duplicadas del gen original. El mismo mecanismo podría aplicarse en la formación de nuevos genes fragmentados a partir de un gen ancestral fragmentado. Estudios realizados en nuestro laboratorio han aportado pruebas de que el gen para la ovotransferrina de gallina, que está dividido en 17 exones, ha evolucionado mediante duplicaciones fusionadas de un gen ancestral que ya estaba fragmentado en siete u ocho exones.

De particular interés se nos muestra la posibilidad de entrecruzamientos intragénicos entre secuencias de intrones mal alineados. Se duplicarían así uno o varios exones, sin que hiciera falta generar nuevas señales de corte y unión. Este mecanismo originaría la amplificación (multiplicación) de uno o varios exones dentro de un gen; ello podría explicar por qué hay (a diferencia de la región variable) varios exones homólogos en el gen que determina la región constante de las cadenas pesadas de las inmunoglobulinas. La existencia de una maquinaria para cortar y unir ARN pudo constituir un requisito previo para la evolución rápida, mediante duplicación de genes, de nuevas funciones celulares: sin la existencia de intrones, en una secuencia de ADN habría habido muy pocos sitios donde, mediante entrecruzamientos no homólogos, pudiese duplicarse una región determinada de ADN con significado adaptativo para el organismo.

Aunque sea prematuro aceptar que la mayoría de los genes fragmentados actuales surgieran de duplicaciones discretas o fusionadas, la frecuencia de entrecruzamientos no homólogos resulta suficientemente alta como para que, al menos, no aparezca improbable. La falta de homología entre los exones del gen de la ovoalbúmina y la localización, que se manifiesta aleatoria, de los intrones no excluyen la posibilidad de que el gen se formase por múltiples y antiguas duplicaciones; éstas serían difícilmente reconocibles debido a la acumulación de mutaciones a lo largo de la evolución.

Hay una propuesta distinta de la duplicación de genes para explicar la formación de intrones. Según Gilbert, al menos algunos genes se formaron por mezclas aleatorias de exones que originariamente estaban dispersos por el genoma, cada uno de los cuales determinaba una proteína funcional. El hecho de que en algunos genes fragmentados (como el de la globina) haya una correspondencia entre exones y regiones de la proteína con una función particular, en ausencia de pruebas reales de alguna duplicación en un gen primordial, ofrece algún apoyo a esta hipótesis.

¿Surgieron los intrones con la evolución de las células eucariotas, o existían ya antes? Parece que, en los eucariotas, la maquinaria de corte y unión es universal, lo que sugiere que ya estaba presente en la primera célula eucariota. El hecho de que los genes procarióticos, y algunos eucarióticos, no estén fragmentados no implica necesariamente que los intrones aparecieran en algún momento de la evolución de genomas constituidos antes por genes no fragmentados. Los genes continuos actuales pudieron haber estado fragmentados hace mucho tiempo, y, perdidos luego por deleción, los intrones. Aunque la deleción exacta de un intrón debe ser un hecho raro, Gilbert y sus colegas han encontrado recientemente, en ratas, pruebas de tales dele-

ciones en uno de los genes duplicados de la insulina. Puede que los procariotas actuales no sean representativos de los que existían antes de la divergencia de los eucariotas, hace más de dos mil millones de años.

En línea con lo avanzado por James E. Darnell, Jr., de la Universidad Rockefeller, y W. Ford Doolittle, de la Universidad Dalhousie, de Nueva Escocia, me inclino a pensar que la maquinaria de corte y unión estaba presente antes de la existencia de los eucariotas, y quizás antes incluso de la existencia de células rodeadas de membrana. Como han indicado D. C. Reanney, de la Universidad de La Trobe, Australia, y Manfred Eigen, del Instituto Max Planck de Química Biofísica, y sus colegas, el ARN puede haber precedido al ADN como material genético primario en los sistemas replicativos precelulares [*véase* "Origen de la información genética", *por* M. Eigen et. al.; Investigación y Ciencia, junio, 1981]. La existencia de un mecanismo para cortar y unir ARN, aunque fuera impreciso, habría beneficiado a los sistemas precelulares, pues les permitiría generar muchas moléculas diferentes a partir de la fragmentación de una sola molécula de ARN y unir así la información útil que estuviese dispersa por una región del genoma primitivo.

De acuerdo con este razonamiento, los procariotas actuales no serían los antepasados de las células eucarióticas. Probablemente desciendan de células que, durante la evolución, han eliminado gradualmente su ADN extra, sin información útil, a la vez que incrementaban su tasa de crecimiento al disminuir la cantidad de ADN que había que replicar en cada generación; de esta forma, se eliminaron todos los intrones y la maquinaria de corte y unión se hizo innecesaria. Por otro lado, en las células eucarióticas, esta maquinaria se fue perfeccionando a medida que los organismos evolucionaban, de suerte que la presencia de una gran cantidad de ADN sin información válida no supusiera una carga energética significativa. Para dichos organismos, la maquinaria de corte y unión representaba un maravilloso mecanismo con el que generar nuevas funciones, a partir de otras antiguas, y, por tanto, les capacitaba para explorar nuevas vías de evolución. Si, como una vez propuso François Jacob, la evolución recuerda el oficio del calderero, la maquinaria de cortar y unir ARN le vino de perlas para acelerar sus "remiendos" con la información genética.

Nos atrae mucho la idea de que los genes fragmentados reflejen la organización de los genes primitivos y que la mayoría de los intrones actuales sean subproductos de la creación de nuevas funciones por duplicación de genes. Se puede argumentar, sin embargo, que los intrones son realmente elementos genéticos móviles, similares a los "transposones" de las células procarióticas, insertados, a lo largo de la evolución, en genes antes enteros. No hay pruebas de que alguno de los actuales genes fragmentados se haya originado así, pero eso no excluye la posibilidad de que tales inserciones puedan haber contribuido a generar intrones en alguna etapa temprana de la evolución.

Y para terminar, ¿por qué se han conservado como tales las secuencias intrónicas a lo largo de la evolución de los eucariotas? No es probable que la mayoría de los intrones actuales tengan elementos reguladores o informativos tan esenciales como para excluir la posibilidad de su pérdida por deleción. La evolución no es previsora; no cabe, pues, argumentar que los intrones se han conservado porque servirán en el futuro. La explicación más sencilla es que los intrones se han conservado por la sencilla razón de que las células de los eucariotas superiores carecen de una forma eficaz de eliminarlos con precisión. La mayoría de los intrones actuales deberían entonces considerarse reliquias de la evolución, junto con la mayoría de los otros ADN "sin función" que se encuentra en las células ecuarióticas.

Ni debemos suponer que las secuencias intrónicas, una vez establecidas, no puedan ser útiles. Así, Gilbert, entre otros, ha sugerido que la presencia de intrones en un gen incrementa la velocidad con que pueden recombinarse eficazmente las secuencias de los diferentes exones de ese gen. (La tasa de recombinación es mayor en los segmentos de ADN que están separados que en los que están juntos.) Ello implica que los exones con mutaciones particularmente ventajosas, situados en diferentes alelos de un gen, tengan mayor probabilidad de recombinarse para producir un nuevo alelo, doblemente ventajoso. Sin embargo, de momento todo esto no es más que pura especulación. No puede excluirse la posibilidad de que los intrones estén implicados en funciones muy diferentes, todavía por descubrir, que afecten a la organización y expresión de la información genética en las células eucariotas.

Las fuentes de brotes celestes de rayos X

Causados por fogonazos termonucleares en estrellas de neutrones de sistemas binarios, un solo brote emite, en segundos, tanta energía en forma de rayos X cuanta radia el Sol en todas las longitudes de onda en dos semanas

Walter H. G. Lewin

Los astrónomos deben muchos de sus conocimientos del universo a la extraordinaria regularidad que muestran los sucesos celestes. Los movimientos regulares del Sol, la Luna y los planetas, comparables al de un reloj, y a los que estamos acostumbrados, pueden advertirse también, en una escala enormemente diferente, en las revoluciones de los sistemas de estrellas binarias y en los radioimpulsos que se han detectado, procedentes de estrellas de neutrones en rotación. En los últimos decenios, sin embargo, se ha descubierto cierto número de fenómenos celestes que no son periódicos. Esos hallazgos revelan, con frecuencia, un firmamento más violento y menos ordenado que el que suponía la generación anterior.

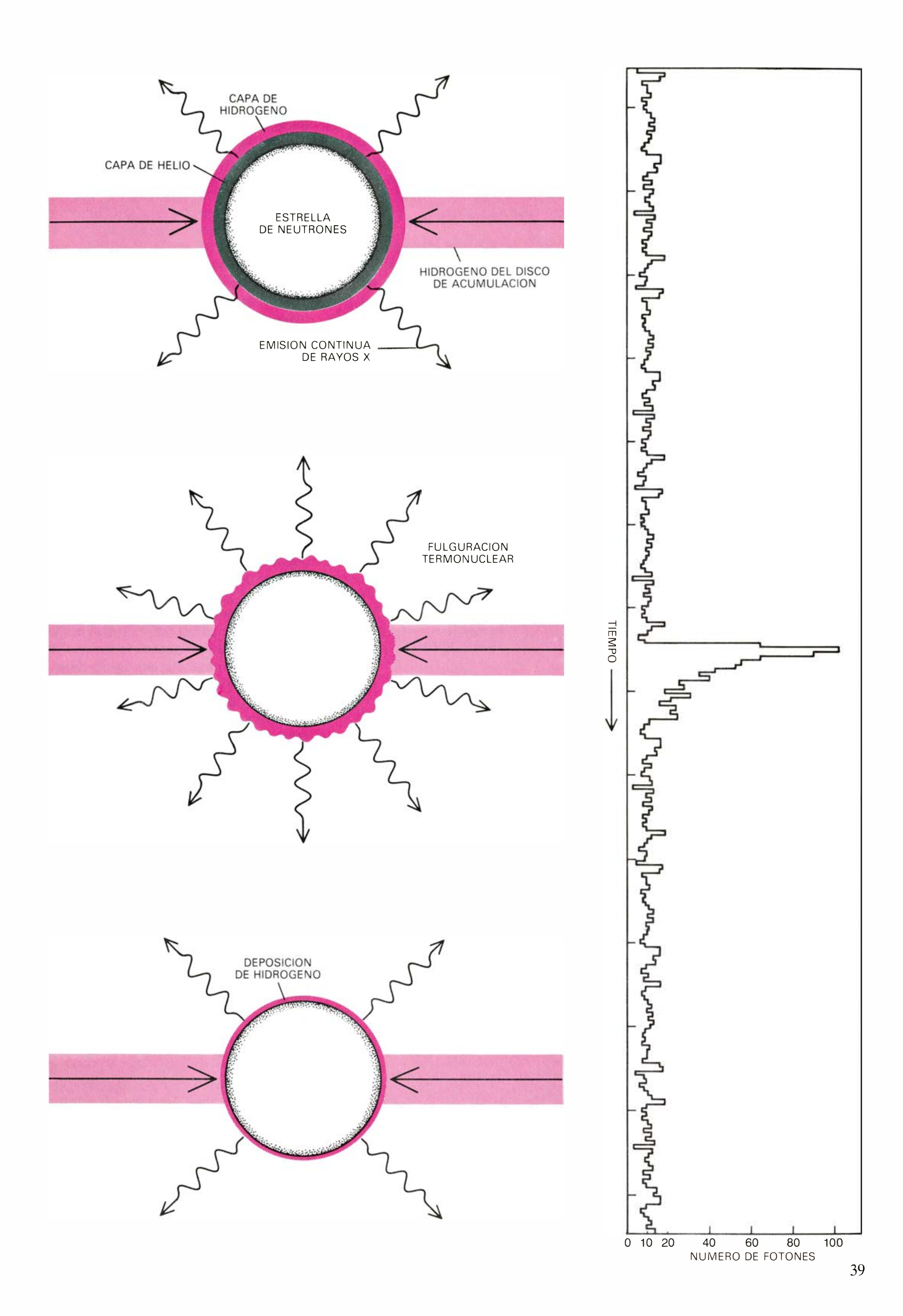
En 1975 y 1976, una importante clase de fenómenos aperiódicos llamó la atención de los astrónomos. Se observó que se emitían breves brotes de rayos X por fuentes sitas cerca del centro de nuestra galaxia y en los cúmulos globulares de estrellas. Aunque no se trata de sucesos singulares y aislados, tampoco mantienen una secuencia regular; por el contrario, se repiten a intervalos irregulares que van desde varias horas hasta algunos días. Parecen indicar violencia explosiva y liberan prodigiosas cantidades de energía en forma de rayos X. Un brote típico alcanza su máxima intensidad en segundos o antes; la fuente se desvanece luego hasta alcanzar su nivel constante de emisión de rayos X anterior al brote, en cuestión de un minuto. A lo largo de este breve intervalo se emiten alrededor de 10^{39} erg de energía en rayos X, lo que equivale a la energía radiada por el Sol en todas las longitudes de onda en unas dos semanas.

Se sabía que las fuentes de brotes de rayos X eran objetos extraordinarios, aun antes de que se descubriesen los brotes. En el cielo de los rayos X, inaccesible a la observación hasta que los cohetes, globos y satélites lograron salvar la atmósfera terrestre, opaca a ese tipo de radiación, las fuentes figuran entre los objetos más luminosos de nuestra galaxia. A longitudes de onda visibles, centuplican la emisión de energía del Sol, lo que no constituye ningún motivo especial de distinción. Sin embargo, en la región de rayos X del espectro electromagnético, emiten un flujo continuo de energía cuya potencia supera, en más de mil millones de veces, la radiación X procedente del Sol. La energía de los brotes de rayos X es adicional a la del flujo continuo. De ahí la perplejidad de los astrónomos, antes incluso del descubrimiento de los brotes. ¿Qué clase de objeto es capaz de una emisión de rayos X tan intensa y continua? ¿Qué mecanismo abastece la fuente?

A principios del decenio de 1970, algunos astrónomos creyeron que tenían respuesta para esas preguntas. Y aunque en lo esencial han resultado ser las correctas, sólo recientemente se ha caído en la cuenta de que tales respuestas se podían aplicar a clases de objetos bastante diferentes. Las primeras indicaciones apuntaban hacia la posibilidad de que una estrella de rayos X fuese un objeto superdenso y gravitatoriamente contraído, una estrella de neutrones, por ejemplo, o quizás, en algunos casos, un agujero negro. Las estrellas de neutrones han agotado su provisión de combustible nuclear; el calor generado en el interior de la estrella ya no basta, pues, para contrarrestar la fuerza atractiva de la gravedad. La estrella se colapsa bajo su propio peso hasta que los protones y electrones de sus átomos constituyentes se funden para formar una masa de neutrones fuertemente comprimidos. Los neutrones pueden resistir algún colapso gravitatorio adicional en estrellas de masas hasta tres veces la solar. Se cree que, en las estrellas de masa superior, el colapso catastrófico continúa hasta formarse un agujero negro, región del espacio donde ha caído la estrella. En el "horizonte" de un agujero negro, que no es una superficie física sino una separación definida matemáticamente, la velocidad que la materia necesita para escapar de la influencia del agujero negro es igual a la velocidad de la luz.

Una estrella de neutrones o un agujero negro podrían explicar la fuerte emisión de radiación X en razón del campo gravitatorio, extraordinariamente grande, de la estrella colapsada.

SE CREE QUE LOS BROTES DE RAYOS X de gran energía se originan en sistemas de estrellas binarias en los que uno de los miembros del par es una densa estrella de neutrones. La materia, en su mayor parte hidrógeno, sale desprendida de la superficie de una estrella normal compañera que consume combustible nuclear (muy parecida al Sol) por el poderoso campo gravitatorio de la estrella de neutrones. Al caer el hidrógeno sobre la superficie de la estrella de neutrones, libera gran parte de su energía potencial gravitatoria en forma de emisión continua de rayos X. Cuando el hidrógeno alcanza la superficie, se acumula en una capa de alrededor de un metro de espesor. La fusión de los núcleos de hidrógeno para formar helio origina una capa de helio que también tiene un espesor de alrededor de un metro y se sitúa debajo del hidrógeno. El espesor de las capas no está dibujado a escala; el radio de la estrella es de unos 10 kilómetros. Cuando se han acumulado aproximadamente 10^{21} gramos, la densidad y temperatura de la capa de helio se pueden hacer críticas, de modo que los núcleos de helio se combinan bruscamente por fusión termonuclear para dar carbono. La fulguración termonuclear resultante se ve desde la Tierra como un brote de rayos X. La gráfica de la derecha muestra el perfil del primer brote de rayos X descubierto. Los datos se recogieron con el telescopio orbital de rayos X del Satélite Astronómico Holandés (*ANS*) de una fuente de rayos X en el cúmulo globular NGC 6624 el 28 de septiembre de 1975. La escala vertical representa intervalos discretos de tiempo; en la escala horizontal se indica el número de fotones de rayos X detectados por ese mismo telescopio orbital durante cada intervalo temporal.


CAPA DE HIDROGENO
CAPA DE HELIO
ESTRELLA DE NEUTRONES
HIDROGENO DEL DISCO DE ACUMULACION
EMISION CONTINUA DE RAYOS X
FULGURACION TERMONUCLEAR
DEPOSICION DE HIDROGENO
TIEMPO
0 10 20 40 60 80 100
NUMERO DE FOTONES

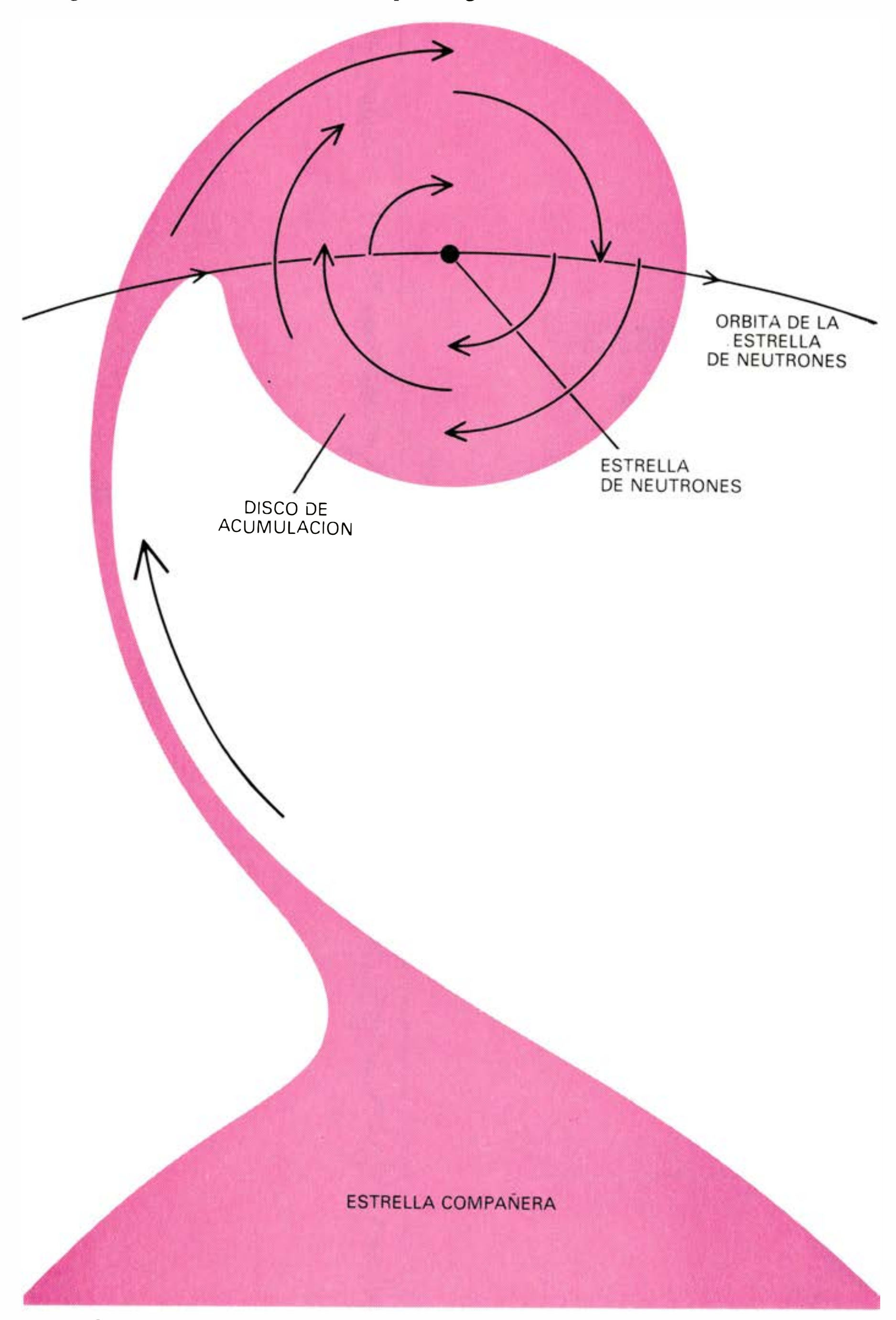
Así, una estrella de neutrones que tenga una masa comparable a la del Sol posee un radio de sólo unos 10 kilómetros. (El radio del Sol mide unos 700.000 kilómetros.) La intensidad del campo gravitatorio en la proximidad de la superficie de la estrella de neutrones multiplica unas 100.000 millones de veces la del campo gravitatorio en la superficie de la Tierra. Si existe alguna fuente exterior de materia que pueda ser capturada por tal campo gravitatorio, la materia caerá hacia la estrella. La materia se acelerará hasta alcanzar una gran velocidad, se calentará por tanto hasta temperaturas muy altas y emitirá la radiación característica de tales temperaturas. Estas varían de 10 millones a 100 millones de grados Kelvin. La radiación generada a tales temperaturas se encuentra predominantemente en la región de rayos X del espectro electromagnético.

¿Cuál es la fuente externa de la materia que cae? Un buen candidato para tal papel sería una estrella próxima ligada gravitatoriamente a una estrella de neutrones o a un agujero negro en un sistema binario en rotación mutua. Tal estrella compañera estaría todavía consumiendo su combustible nuclear, como le ocurre al Sol. Si la estrella compañera se hallara lo bastante próxima al cuerpo colapsado gravitatoriamente, la materia (hidrógeno sobre todo) podría fluir hacia el cuerpo más denso. Como las dos estrellas giran rápidamente, una en torno a la otra, la materia formaría en muchos casos un disco giratorio de acumulación, desde el cual caería hasta la superficie de la estrella colapsada describiendo trayectorias espirales.

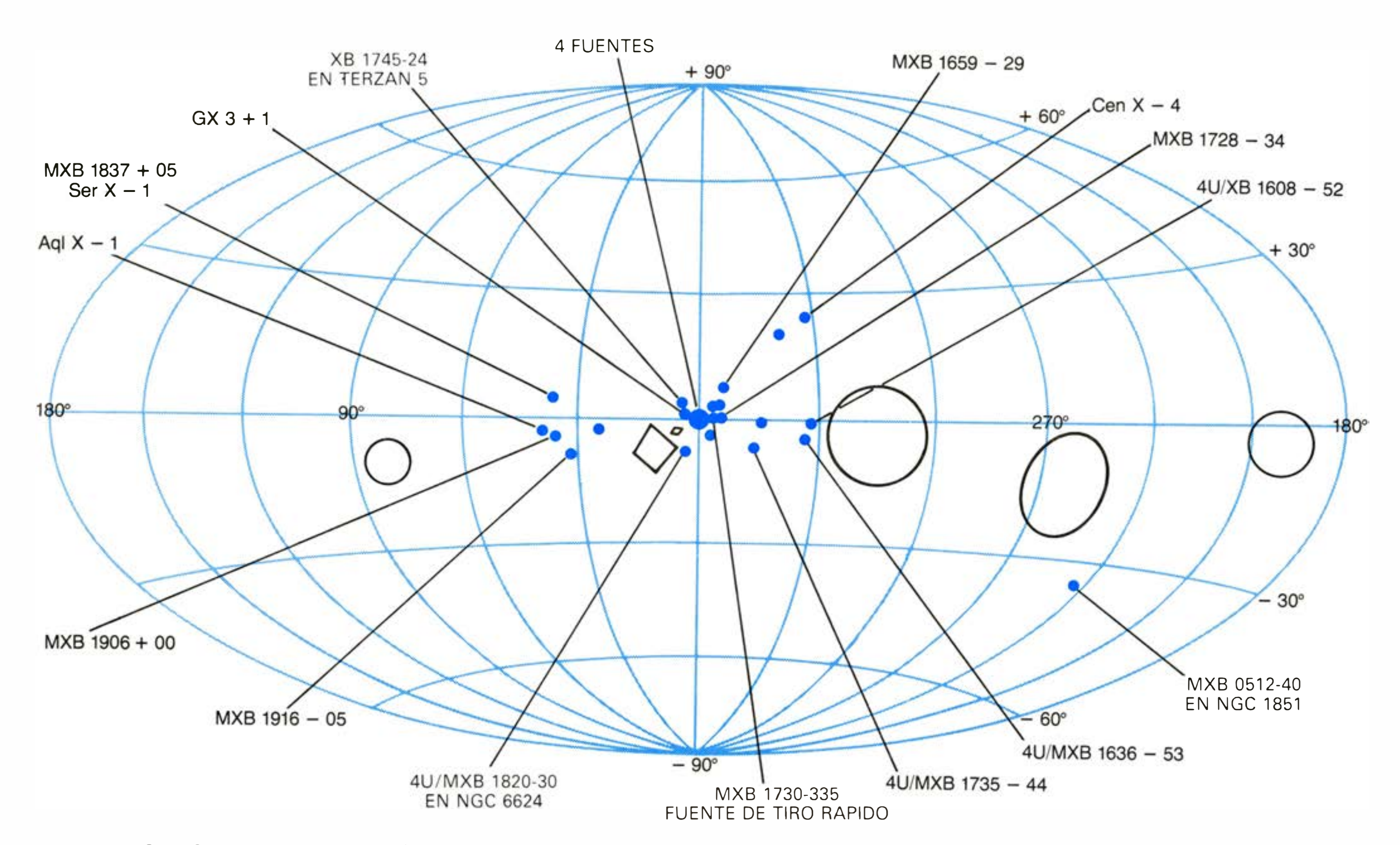
En 1971, este modelo de estrella binaria (con la de neutrones en el papel de densa fuente de rayos X) demostró explicar en forma concluyente dos fuentes intensas de rayos X, gracias a los trabajos de Riccardo Giacconi, Ethan J. Schreier, Harvey D. Tananbaum y sus colaboradores, de la American Science and Engineering Corporation. En los datos recogidos por el observatorio orbital de rayos X *Uhuru,* Giacconi, Schreier y Tananbaum descubrieron variaciones marcadamente regulares en la intensidad de los rayos X, unas de corto período y otras de período largo. Las primeras, o pulsaciones, cuyos períodos son de algunos segundos, se explican por la rotación de una estrella de neutrones fuertemente magnetizada cuyo eje del dipolo magnético no está alineado con el eje de rotación. En el intenso campo magnético, la materia que se acumula cae sólo cerca de los polos magnéticos, creando dos zonas calientes, en la superficie, que giran con la estrella. Las zonas calientes en rotación dan lugar a pulsaciones de rayos X, cuando las registra un observador terrestre.

Ahora bien, los agujeros negros no pueden tener ni superficie ni un campo magnético intenso; quedan, pues, descartados como posibles fuentes de rayos X pulsantes. Las variaciones de los rayos X observadas a plazo más largo, con períodos de días, las origina el eclipse periódico de la estrella de neutrones por la compañera, mucho mayor.

A raíz de tan importante descubrimiento, algunos astrónomos creyeron que la mayoría de las intensas fuentes de rayos X de nuestra galaxia se asemejarían a esos dos sistemas estelares. Para poner a prueba la hipótesis, se examinaron muchas fuentes de ésas, en busca de indicaciones de pulsación de rayos X y de eclipses. Hacia 1975, se habían encontrado varios sistemas binarios de rayos X más, pero ni con mucho tantos como se esperaba. Además, la investigación puso también de mani-



LAS ENORMES FUERZAS ATRACTIVAS creadas por el campo gravitatorio de una estrella de neutrones deforman la cercana estrella compañera binaria y arrancan materia de su superficie. Como las dos estrellas giran en recíproca rotación, la materia desprendida de la estrella compañera describe espirales formando un disco de acumulación antes de caer sobre la estrella de neutrones. La densa masa de una estrella de neutrones crea un campo gravitatorio unas 100.000 millones de veces más intenso que el campo gravitatorio de la vecindad de la superficie terrestre. La luz visible del disco nos revela su geometría.



MAPA DEL CIELO, que muestra la posición (en coordenadas galácticas) de 31 fuentes de brotes de rayos X, basado en los datos disponibles el primero de diciembre de 1980. Los círculos y diamantes indican regiones donde se ha observado una fuente de brotes. Las fuentes están concentradas cerca del centro galáctico, a una distancia de unos 30.000 años-luz del sistema solar. Se han descubierto al menos 11 fuentes de brotes en los cúmulos globulares, sistemas autogravitatorios constituidos por 100.000 antiguas estrellas. Ello constituye una prueba valiosa en pro de la antigüedad de las fuentes de brotes.

fiesto un gran número de fuentes de rayos X que no mostraban rastro de compañera binaria y en las que no se observaban pulsaciones de rayos X. En buena lógica, el fracaso a la hora de detectar eclipses o pulsaciones no demuestra que una tal fuente de rayos X no sea miembro de un sistema binario o que no sea una estrella de neutrones: la ausencia de pruebas no es prueba de la ausencia. Sin embargo, se sospechó desde el principio que tales fuentes de rayos X forman una clase de objetos distintos de aquellos cuya naturaleza binaria se establece fácilmente.

En la mayoría de los sistemas obviamente binarios, la estrella compañera es brillante y de masa entre 10 y 20 veces la del Sol. Tales sistemas deben de ser relativamente jóvenes, porque las estrellas con una masa de unas 20 veces la solar consumen su combustible nuclear en varios millones de años. A estas fuentes jóvenes de rayos X las llamaré objetos de Clase 1. La mayor parte de las fuentes de rayos X no pulsantes y no eclipsantes se encontraron en la región general del centro galáctico y en los cúmulos globulares. Se sabe por otros caminos que las estrellas de los cúmulos globulares figuran entre las más antiguas de la galaxia. La distribución de fuentes de rayos X no pulsantes y no eclipsantes implica, por tanto, que muchas de ellas tienen una edad de 10.000 millones de años. Les llamaré objetos de Clase 2.

Hacia 1976, se habían establecido varios criterios para adscribir una fuente de rayos X a la Clase 2: carecer de brillante contrapartida óptica, no presentar pulsaciones de rayos X ni eclipses de ellos y hallarse frecuentemente en una región asociada con estrellas antiguas. Aun cuando podían clasificarse los objetos, los astrónomos no comprendían de qué clase de sistemas se trataba. La verdadera identidad de los objetos de Clase 2 continuó envuelta por el misterio durante varios años.

Misterio que prolongó las vidas de varias hipótesis diferentes sobre la naturaleza de esta clase de estrellas de rayos X. ¿Podrían algunas de ellas ser agujeros negros únicos o estrellas de neutrones únicas y no pulsantes? Un objeto único, singular, no estaría, evidentemente, sujeto a eclipses ni asociado a una brillante estrella compañera. Los agujeros negros no pueden, de ningún modo, presentar pulsaciones, y éstas tampoco deben esperarse de una estrella de neutrones con un campo magnético débil, o de una que tuviera el eje del dipolo magnético alineado con el eje de rotación. Quizás así podría explicarse la ausencia de eclipses y pulsaciones en las fuentes de Clase 2.

Y, ¿qué ocurre con la fuente de la materia que debe caer sobre la superficie de una estrella única para generar rayos X? Justificar la luminosidad observada de los rayos X exige una velocidad de deposición de unos 10^{17} gramos por segundo. (A este ritmo, se necesitarían unos 2000 años para acumular una masa comparable a la de la Tierra.) Un agujero negro o una estrella de neutrones de aproximadamente una masa solar tendrían que estar rodeados de una nube de gas de tamaño y densidad suficientes para mantener esa velocidad de deposición. Pero unas nubes de gas tan grandes y densas no habrían pasado desapercibidas. Podemos descartar, pues, las estrellas de neutrones únicas y los agujeros negros solitarios de masa aproximadamente igual a la solar.

Mas la no detección de tales nubes de gas podría explicarse en el caso de que se tratara de un gas de muy baja densidad que rodease a un objeto de masa mucho mayor. En 1975, John N. Bahcall, del Instituto de Estudios Superiores, y Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, e independientemente Joseph Silk y Jonathan Arons, de la Universidad de California en Berkeley, propusieron la hipótesis de que los objetos de Clase 2 podrían

ser agujeros negros de masa superior a cien veces la del Sol, que atrajesen materia procedente de una tenue nube circundante.

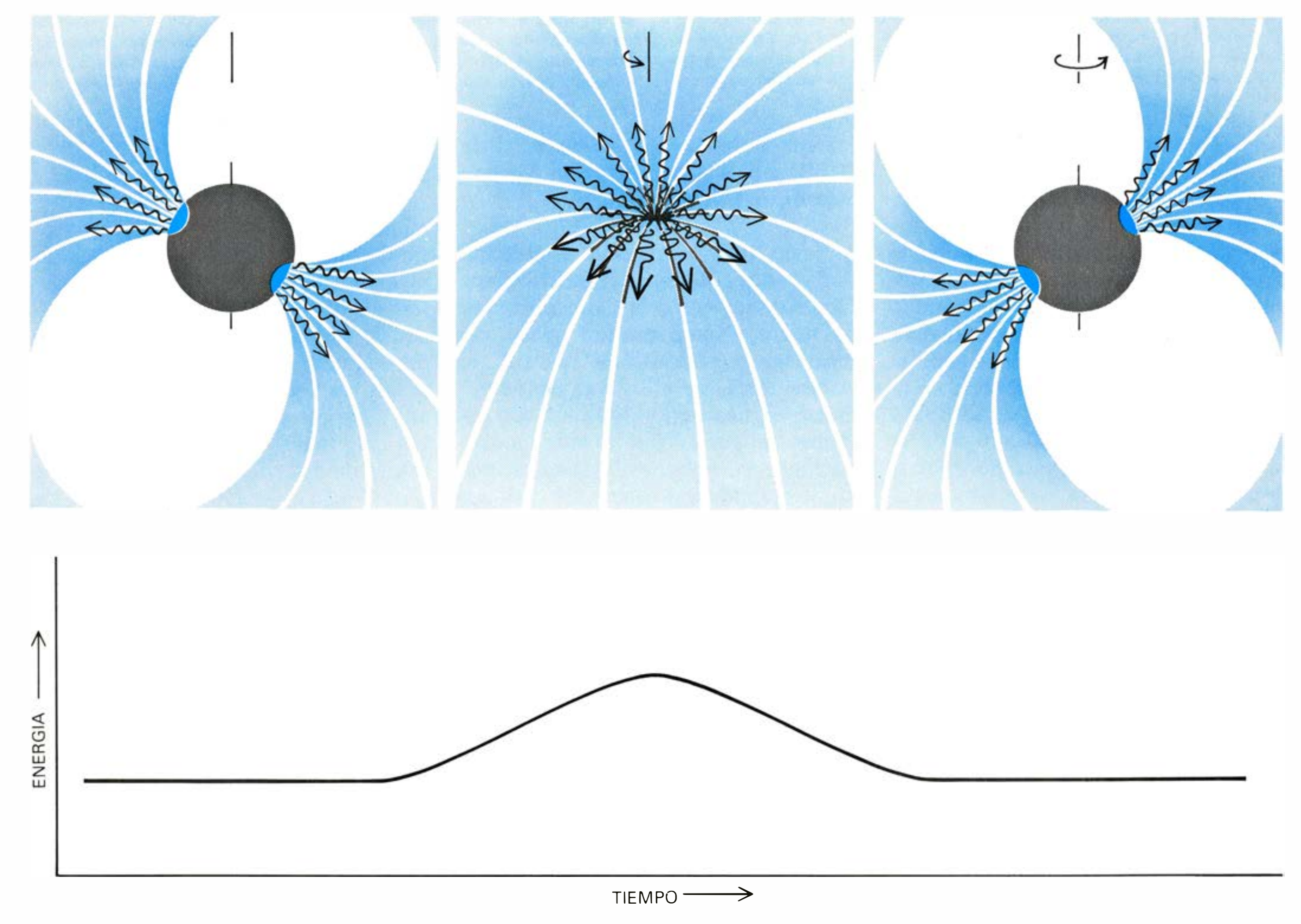
Más tarde, en el mismo año, se descubrieron los brotes de rayos X. Observando con el Satélite Astronómico Holandés (ANS), Jonathan E. Grindlay, del Observatorio del Harvard College, y John Heise, del Laboratorio de Investigación Espacial del Instituto Astronómico de Utrecht, hallaron dos brotes emitidos por un objeto situado en el cúmulo globular designado NGC 6624. Richard D. Belian, Jerry P. Conner y W. Doyle Evans, del Laboratorio Científico de Los Alamos, descubrieron, a su vez, brotes en observaciones realizadas con los satélites Vela.

La lista no paró ahí. Posteriormente, el autor y sus colaboradores, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, hallaron cinco brotes más de rayos X en menos de dos meses de vigilar el Tercer Pequeño Satélite Astronómico (*SAS-3*). Antes de terminar 1976, se habían identificado otras 10 fuentes de brotes por varios grupos empleando el Octavo Observatorio Solar Orbital, el *SAS-3*, los satélites Vela y el satélite *Uhuru*. Todos los brotes eran emitidos por objetos de Clase 2, aunque no todos los objetos de Clase 2 emitían brotes.

Pese a nuestra perplejidad inicial acerca de la naturaleza de esos curiosos sucesos aperiódicos, se nos ocurrió a algunos que los brotes podían contener la clave de los secretos de la totalidad del grupo de las fuentes de rayos X de Clase 2. Alguien lanzó la idea de que los brotes podían apoyar la hipótesis del agujero negro de gran masa. Grindlay y Herbert Gursky, del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, avanzaron que los perfiles de los brotes (o registros de la señal de rayos X en función del tiempo) podrían originarse cuando un gas caliente dispersa un brote primario de rayos X. Creían que la temperatura del gas tendría que ser de unos mil millones de grados, e hicieron observar que un gas así escaparía del campo gravitatorio de un objeto cientos de veces más ligero que la masa solar. En consecuencia, sugirieron que los brotes se originaban cerca de un agujero negro de gran masa. No se proponía mecanismo alguno para la fuente de los brotes primarios, pero la deposición de materia procedente de la nube circundante sobre el agujero negro bastaría probablemente para explicarlos. Aunque sobrado de ingenio, el razonamiento fallaría.

La prueba manifiesta de la necesidad de un único agujero negro de gran masa postulada en este modelo quedó desechada por una inspección más detallada de los perfiles de los brotes. El modelo predice un tamaño para el horizonte del agujero negro donde se producen los sucesos mucho mayor que el tamaño de la fuente que puede deducirse de la información suministrada por los perfiles de los brotes.

A partir del espectro de rayos X observado durante el brote, podemos deducir el tamaño de la región emisora.



ZONAS CALIENTES DE RAYOS X creadas por el intenso campo magnético de una joven estrella de neutrones. Dichas zonas originan un haz de rayos X cuando el polo magnético y el eje de rotación de la estrella no están alineados. La materia que cae sobre la superficie de la estrella de neutrones procedente del disco de acumulación se concentra a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético. Para un observador fijo, el haz en rotación da lugar a pulsaciones: aumentos periódicos en la cuenta de fotones de rayos X que alcanzan los detectores montados en satélites en órbita alrededor de la Tierra. La ulterior rotación mostrará un segundo impulso, esta vez procedente del otro polo magnético de la estrella. Las pulsaciones de rayos X se observan frecuentemente en los objetos de Clase 1. En los objetos de Clase 2, por el contrario, la estrella de neutrones es antigua y no produce impulsos.

Las variaciones en los espectros observados en diversas bandas de energía de los rayos X revelan que la fuente de rayos X se está enfriando. En el máximo de un brote, se emiten rayos X con energías comprendidas entre un kiloelectronvolt y 20 kiloelectronvolt (keV). Más tarde, cuando el objeto se ha enfriado, no se producen ya en forma eficaz rayos X de alta energía; el espectro de rayos X del brote presenta entonces energías variables entre aproximadamente uno y 7 keV. Así pues, los rayos X de baja energía procedentes de los brotes se desvanecen más lentamente que los rayos X de alta energía.

Al analizar estos espectros de brotes de rayos X, Jean H. Swank y sus colaboradores, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), observaron que el espectro de rayos X de un brote particularmente largo se parecía al espectro de un cuerpo negro que se estuviera enfriando. Un cuerpo negro ideal (que no debe confundirse con un agujero negro) absorbe toda la radiación que incide sobre él; el espectro de radiación emitido por el cuerpo negro sólo depende de su temperatura. De aquí que la temperatura de un cuerpo negro pueda calcularse a partir de su espectro observado.

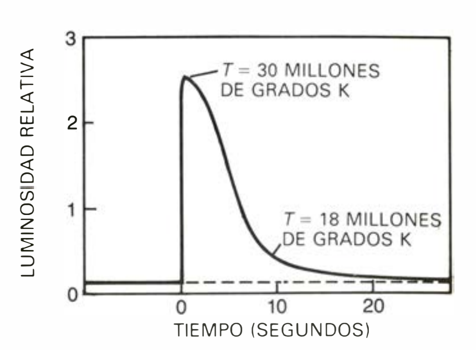
La luminosidad total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura y proporcional, también, al área de su superficie. La luminosidad se puede estimar a partir del flujo de energía recibido en la Tierra, si se conoce la distancia al cuerpo y si se puede suponer que el cuerpo radia igualmente en todas las direcciones. Conociendo, pues, el espectro y la distancia, podemos determinar el área de la superficie de un cuerpo negro astronómico. Cuando Swank y sus colaboradores mostraron que el espectro de la fuente de brotes de rayos X que ellos habían observado era el de un cuerpo negro, estuvieron en condiciones de calcular el área de la superficie (y el radio) de la fuente.

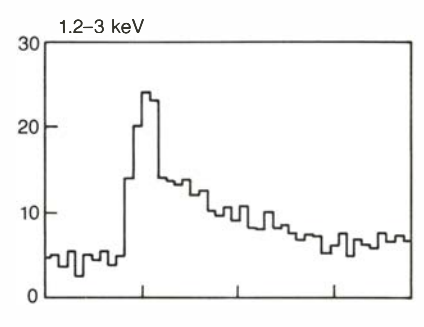
La mayoría de las fuentes de rayos X se encuentran cerca del centro de la galaxia, que, como se sabe, se halla a 30.000 años-luz del sistema solar. No era, pues, descabellado que Swank supusiera que tal era la distancia a la fuente de brotes observada. La temperatura del brote subió a 26 millones de grados K en los primeros 60 segundos y después se enfrió hasta 15 millones de grados K en los 100 segundos siguientes. De estos datos, Swank y sus colaboradores calcularon un radio de unos 100 kilómetros durante los primeros 15 segundos del brote y un radio, aproximadamente constante, de unos 15 kilómetros, luego.

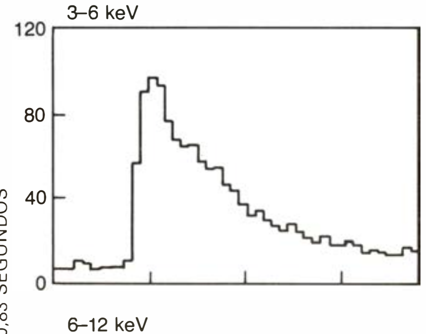
En el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), mi discípulo John P. Doty, Jeffrey A. Hoffman y yo seguimos el ejemplo de Swank a la hora de calcular los radios de otras dos estrellas de rayos X que emitían brotes. En ambos casos, los radios eran de unos 10 kilómetros durante todo el período de enfriamiento. No pudimos medir los radios de las estrellas de rayos X durante el crecimiento de los brotes, cuando la temperatura subía, porque en ese período los espectros no se parecían al de un cuerpo negro. Un año más tarde, Jan van Paradijs, de la Universidad de Amsterdam, puso de manifiesto que un radio pequeño, del orden de 10 kilómetros, era una propiedad de todas las fuentes de brotes.

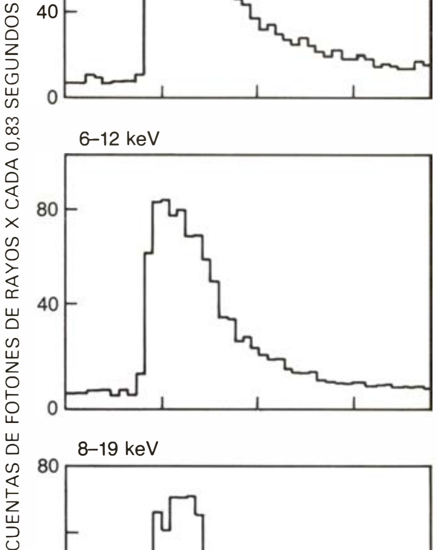
Esos pequeños tamaños suministran la primera indicación convincente de que el objeto emisor de rayos X es una estrella de neutrones. Si la fuente de los brotes fuera un agujero negro de unas 100 masas solares, sería de esperar que los radios hallados midieran más de 300 kilómetros, que es el radio teórico del horizonte de sucesos de tal agujero negro. Así pues, el modelo de un único agujero negro de gran masa absorbiendo materia de una nube de gas circundante parece descartado por los cálculos de tamaños. Y el agujero negro de gran masa es, probablemente, el único objeto capaz de arrastrar hacia sí la materia difusa de una nube de gas circundante a la velocidad requerida.

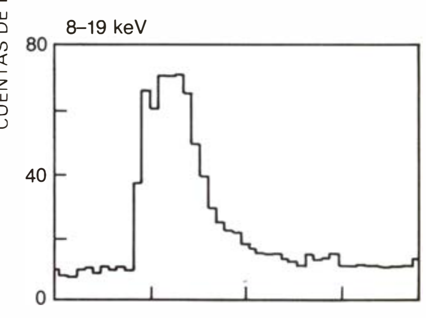
De esta manera, las mediciones de radios proporcionaron también la primera señal convincente de que la fuente de materia para las fuentes de brotes de rayos X era una estrella compañera, gravitatoriamente ligada, formando un sistema binario. Aunque cabría que las estrellas de brotes de rayos X fueran agujeros negros pequeños de unas pocas masas solares en sistemas binarios, nuestra experiencia con los objetos de rayos X de Clase 1 no abonaba precisa-

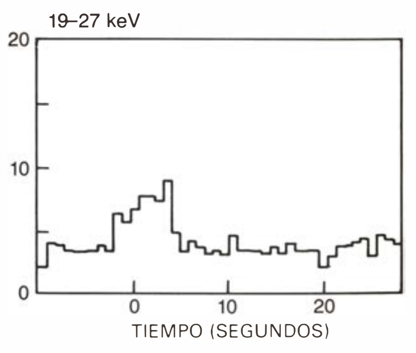












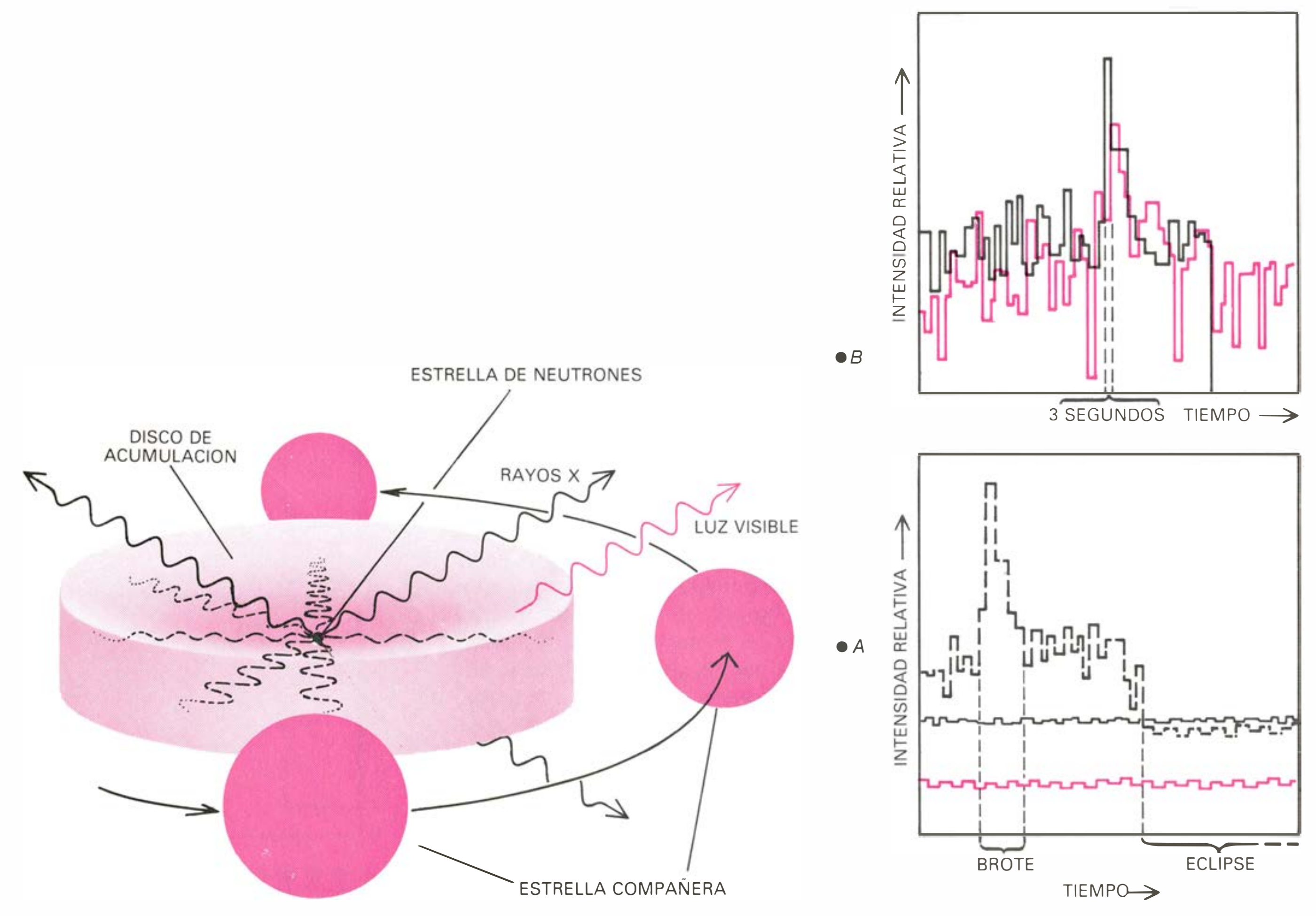
UN BROTE TEORICO de rayos X comparado con los perfiles de brotes observados de la fuente MXB 1728-34 en cinco bandas de energía. Para cada banda de energía, el gráfico representa la suma de la energía en siete brotes de rayos X de la fuente. La duración de los brotes disminuye a medida que aumenta la energía de rayos X. El carácter de esta variación ha mostrado que está produciendo enfriamiento a la manera del cuerpo negro tras una rápida subida inicial de la temperatura. El brote teórico fue construido por Paul C. Joss, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, a base de un modelo de fulguración termonuclear. Los datos de rayos X se obtuvieron mediante el Tercer Pequeño Satélite Astronómico (*SAS-3*) por Jeffrey A. Hoffman, John P. Doty y Walter G. Lewin, del MIT.

mente esa idea. Los emisores de la Clase 1 habían sido identificados ya como estrellas de neutrones en sistemas binarios, y no existían razones para suponer ahora que las fuentes de brotes fueran algo diferente.

Si las fuentes de brotes, aparte de los brotes mismos, representan fuentes de Clase 2, entonces la mayoría de estas últimas son, probablemente, estrellas de neutrones en sistemas binarios. Pero si se trata de sistemas binarios ¿cómo explicar la ausencia de eclipses, de brillantes estrellas compañeras, de corrimientos Doppler periódicos en los espectros y de otras pruebas observacionales que suelen requerirse para establecer la existencia de una sistema estelar binario?

En 1977, Edward P. J. van den Heuvel, de la Universidad de Amsterdam, sugirió que la masa de las estrellas compañeras en las fuentes de rayos X de Clase 2 podía compararse con la masa solar. Esto significaría que las estrellas compañeras binarias en los sistemas de Clase 2 tendrían una masa mucho menor que la de las estrellas compañeras en los sistemas de Clase 1. Posteriormente, Paul C. Joss y Saul A. Rappaport, del MIT, sugirieron que la masa de las estrellas compañeras no detectadas podría ser inferior a 0,5 masas solares. Una estrella de masa tan pequeña no brillaría lo suficiente para ser visible a las distancias estimadas para los objetos de Clase 2, unos 30.000 años-luz. A tal distancia, el Sol aparecería como una débil estrella de vigésima magnitud, y la absorción de la luz por el polvo interestelar la palidecería todavía más. Sólo la detectarían los mayores telescopios ópticos.

Aunque una estrella compañera de pequeña masa puede resultar, con frecuencia, demasiado débil para ser observada, podría demostrarse, no obstante, la naturaleza binaria de un sistema de Clase 2 si la fuente de rayos X fuese periódicamente eclipsada por la estrella compañera. Para que el eclipse fuese observable desde la Tierra, el sistema binario debería estar orientado de suerte que la estrella compañera ocultara periódicamente los rayos X emitidos por la estrella de rayos X. La posibilidad de que esto ocurra depende del tamaño de la estrella compañera y de la distancia entre ésta y la estrella de rayos X. Estos dos factores pueden determinarse a partir de propiedades conocidas del sistema. Para una estrella ordinaria que queme combustible nuclear, el tamaño guarda una relación conocida con la masa. La distancia entre los miembros de un sistema binario



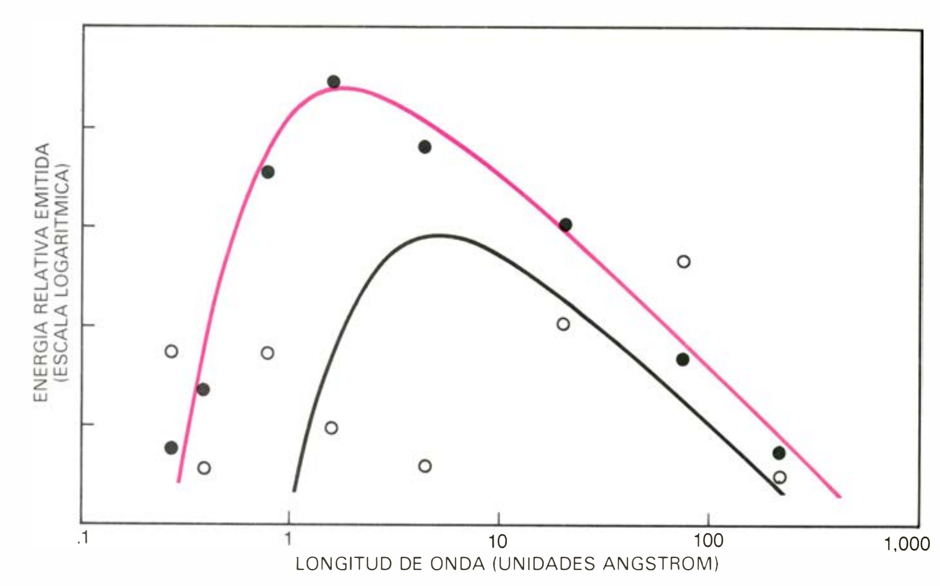
EL PUNTO DE VISTA DEL OBSERVADOR respecto a la orientación de un sistema binario de rayos X que produce brotes (objeto de Clase 2) determina la naturaleza de la radiación X detectada. Si los rayos X no fueran absorbidos por el disco de acumulación, un observador en la dirección *A* vería brotes a intervalos irregulares y decrecimientos claramente periódicos en las cuentas de rayos X, como resultado de los eclipses (*líneas negras de trazos en la gráfica de la derecha*). A causa de la absorción de los rayos X por el disco, sin embargo, el observador en *A* detecta en realidad sólo la radiación X de fondo, que no se origina en la fuente de rayos X (*líneas negras continuas*). Un observador en *B* tampoco puede ver eclipses de rayos X, pero sí detectar brotes de rayos X y aprecia un brote óptico ligeramente retrasado que procede del disco de acumulación (*líneas continuas de color*). El retraso se produce a causa del tiempo necesario para que el brote de rayos X alcance el disco de acumulación y después "reverbere" en fotones ópticos. El observador en *A* puede detectar la luz visible procedente de la estrella compañera, pero no aprecia brote óptico porque el borde del disco visible para él no reverbera. Las gráficas de las intensidades relativas de rayos X y luminosidades ópticas se basan en datos de la primera detección simultánea de un brote en esas dos regiones del espectro, observada el 2 de junio de 1978 de la fuente MXB 1735-44. La estrella de rayos X está cerca del centro de nuestra galaxia. Los datos fueron proporcionados por Jeffrey E. McClintock, Claude R. Canizares, Jan van Paradijs, Jonathan E. Grindlay, Lynn C. Cominsky y el autor de este artículo.

debe ser exactamente la suficiente para que la materia procedente de la compañera de pequeña masa se deposite sobre la estrella de rayos X a la velocidad de acumulación observada.

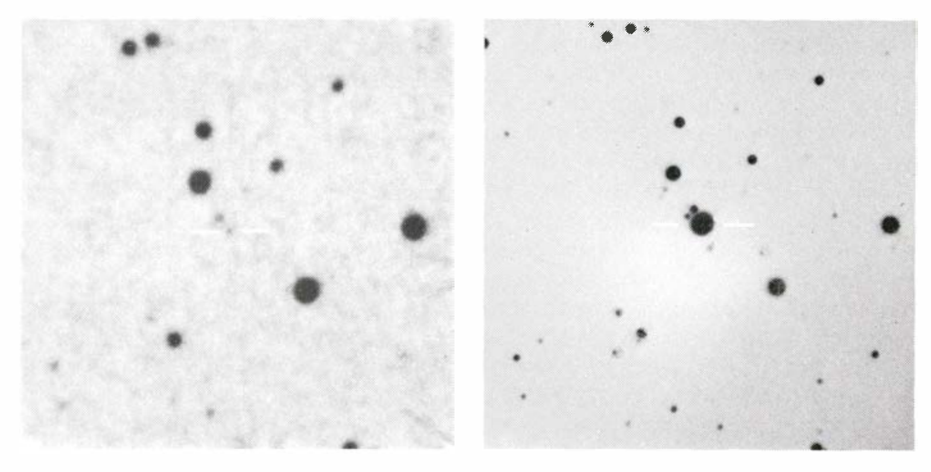
Para mejor comprender las restricciones en el tamaño de la órbita binaria, imagínese en primer lugar que la estrella de pequeña masa que consume combustible nuclear está a una gran distancia de la estrella de neutrones: no hay transporte de masa ni, en consecuencia, emisión de rayos X. Si la estrella que consume combustible nuclear se mueve hacia la estrella de neutrones, la materia de la primera es más fuertemente atraída por el campo gravitatorio de la estrella de neutrones; la estrella que quema combustible nuclear empieza entonces a deformarse en la dirección de la estrella de neutrones. A cierta distancia, que dependerá de la masa de ambas estrellas, la materia que está en la superficie de la estrella que consume combustible nuclear se ve atraída con mayor fuerza por la estrella de neutrones que por su propia estrella. La materia comienza a trasladarse desde la superficie de la estrella que consume combustible nuclear hacia la superficie de la estrella de neutrones. Aproximadamente, esta distancia orbital es la que se emplea para calcular la probabilidad de un eclipse.

El plano orbital del sistema binario puede formar cualquier ángulo con la visual desde la Tierra. Para calcular la probabilidad de un eclipse en un tal sistema orientado al azar, hay que atribuir masas a ambas estrellas. Resulta que, para estrellas de neutrones de aproximadamente una masa solar y para estrellas que queman combustible nuclear de masa aproximada 0,1 veces la del Sol, la probabilidad de que pueda observarse un eclipse de rayos X viene a ser de 1/5. Para estrellas compañeras de mayor masa, la probabilidad aumenta. Como hay buenas razones para suponer que varias de las estrellas compañeras presentan una masa superior a 0,1 masas solares, podría esperarse que una quinta parte de todas las fuentes de Clase 2, al menos, manifestaran eclipses de rayos X. Sin embargo, en una muestra de 20 objetos de Clase 2 estudiados con sumo cuidado, no se detectó eclipse alguno.

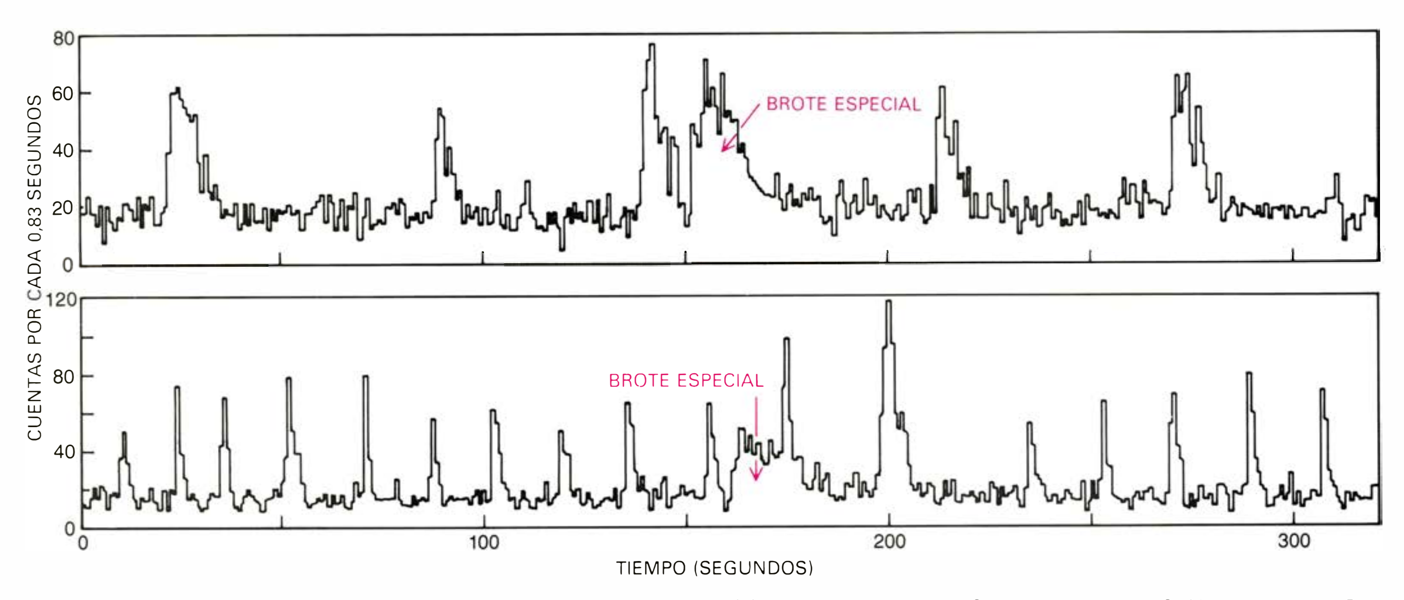
¿Cómo justificar esta laguna observacional? Primero, los discos de acumulación en los sistemas binarios de rayos X, tanto de Clase 1 como de Clase 2, son opacos a los rayos X emitidos en su dirección. Mordechai Milgrom, del Instituto Weizmann de Ciencia, ha señalado una característica de los sistemas binarios de rayos X de pequeña masa que podría impedir la observación de sus eclipses de rayos X, con independencia del ángulo desde el cual se miren. No se verían esos eclipses si la estrella compañera fuese suficientemente pequeña para quedar dentro de la sombra de rayos X producida por el disco de acumulación. Si tal sistema estuviera orientado de suerte que un observador terrestre pudiera ver los rayos X procedentes de la estrella de neutrones, la estrella compañera nunca pasaría entre la estrella de neutrones y la Tierra, y no podrían observarse eclipses de rayos X. Por otro lado, si el sistema estuviera orientado más o menos "de canto" respecto a la Tierra, de manera que la estrella compañera pasase entre la Tierra y la estrella de neutrones, los eclipses de rayos X no se podrían detectar; y ello, por la sencilla razón de que no se detectarían ni siquiera los propios rayos X. En tales circunstancias, la Tierra quedaría también en la sombra arrojada por el disco de acumulación que absorbe los rayos X. En



POR ESPECTRO DEL CUERPO NEGRO se entiende la distribución característica de la energía radiante emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda. Un objeto se llama cuerpo negro cuando absorbe toda la radiación que incide sobre él. Tal objeto emite radiación, cuyo espectro está determinado únicamente por su temperatura. La distribución de energía indicada por los puntos negros se ajusta a la curva de un cuerpo negro correspondiente a la temperatura de 30 millones de grados Kelvin, pero no a la correspondiente a 10 millones de grados Kelvin, de modo que puede deducirse la temperatura de la fuente. La distribución de energía dada por las circunferencias no se ajusta a ninguna curva del cuerpo negro; por consiguiente, no se puede hacer deducción sencilla alguna acerca de la temperatura a que se halle.



AUMENTO DE BRILLO OPTICO de la nova de rayos X Centaurus X-4, descubierto al comparar placas fotográficas de la misma región del cielo tomadas en distintos tiempos. A la izquierda, la estrella aparece en su estado tranquilo en una fotografía hecha con luz azul mediante el telescopio Schmidt de 1,2 metros de monte Palomar. A la derecha está la fotografía tomada por Martha H. Liller, del Observatorio del Harvard College, el 19 de mayo de 1979 con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile. En cada imagen negativa la estrella aparece entre dos rayas de identificación. El aumento de brillo resulta de un aumento de temperatura en el disco de acumulación. El disco se calienta a causa de los rayos X producidos por una nova de rayos X (que es diferente de un breve brote de rayos X). Las fotografías fueron publicadas por Claude R. Canizares, Jeffrey McClintock y Grindlay.



REGISTRO DE UN BROTE DE RAYOS X del MXB 1730-335, la Fuente de Tiro Rápido, que muestra dos clases distintas de brotes. Los brotes indicados por flechas son "brotes especiales" que aparecen con independencia de la sucesión de rápidos brotes repetitivos (los otros máximos en los dos gráficos). Se cree que los brotes especiales son producidos por el mismo mecanismo que origina los brotes de las otras fuentes de rayos X: la fusión termonuclear. Los brotes rápidos son inestabilidades en la velocidad de deposición. Para los brotes rápidos, el tiempo que transcurre después de un brote de rayos X "gordo" (*gráfica superior*) es mayor que el que transcurre entre brotes "delgados" (*gráfica inferior*). Los datos se deben a Hoffman, Marshall y el autor.

cualquiera de los dos casos sería geométricamente imposible observar eclipses de rayos X.

La energía de los rayos X absorbidos por el disco de acumulación se reemite a otras longitudes de onda, incluidas las de la porción visible del espectro. Observado más o menos de canto, el disco de acumulación podría aparecer como un débil objeto estelar, pero no se detectarían rayos X; el carácter del sistema, emisor de rayos X, podría no conocerse nunca. Vistos desde un ángulo oblicuo al plano orbital, podrían observarse el disco de acumulación y la estrella de neutrones. El disco de acumulación se registraría en las longitudes de ondas del visible y, la estrella de neutrones, en la banda de rayos X.

La luz visible procedente del disco de acumulación podría suministrar indicaciones acerca de la geometría del disco. Si hubiese un brusco aumento en la emisión de rayos X procedente de tal sistema, el disco de acumulación "reverberaría", tal vez unos segundos más tarde, con un brusco aumento de la luz visible. Tendría que haber un corto retraso, porque la distancia de la Tierra a la estrella de neutrones emisora de rayos X es menor que la distancia según los otros dos lados de un triángulo, desde la Tierra al disco de acumulación y de éste a la estrella de neutrones. La señal óptica retardada sería también algo borrosa, ya que distintas partes del disco provocarían retrasos diferentes. A partir del retraso y del grado de falta de limpieza, se podría obtener información acerca del tamaño y forma del disco. ¿Se observan alguna vez tales aumentos bruscos en el flujo de rayos X? En efecto, se observan: los aumentos son brotes de rayos X procedentes de objetos de Clase 2.

En el verano de 1977, Hoffman y yo organizamos la primera vigilancia mundial coordinada de brotes. Nos proponíamos observar los brotes con telescopios con base en tierra y con observatorios de rayos X en órbita terrestre, simultáneamente. Participaron unos 44 observatorios astronómicos (ópticos, de infrarrojo y de radio) de 14 países. Las observaciones de rayos X se realizaron con el *SAS-3* por nuestro grupo del MIT.

No es fácil llevar a cabo ese trabajo. Requiere el uso de grandes telescopios ópticos durante el "período oscuro" (en la proximidad de la luna nueva), porque los discos de acumulación son débiles. Además, las fuentes brotan irregularmente, y pasan varios días sin que surja brote alguno. Cuesta convencer a un astrónomo de que consuma el precioso tiempo del período oscuro de un gran telescopio en mirar, noche tras noche, una estrella que no produce brotes.

En nuestro primer intento, se detectaron 120 brotes de rayos X procedentes de 10 fuentes, a lo largo de un intervalo de 35 días. Los observatorios en la Tierra no registraron ninguno de ellos. Se mejoró la sensibilidad óptica, el año siguiente. El 2 de junio de 1978 se realizaron las primeras observaciones coincidentes de un brote óptico y uno de rayos X. La fuente de los brotes se designó MXB 1735-44. (MXB significa fuente de brotes de rayos X del MIT.) La fuente tiene una débil contrapartida óptica, ordinariamente de magnitud 17,5, descubierta en 1977 por Jeffrey E. McClintock, del MIT. En el máximo del brote óptico, que se produjo con algunos segundos de retraso respecto al máximo del brote de rayos X, el flujo óptico observado fue casi el doble del flujo antes y después del brote.

Desde entonces se han contabilizado otras dos fuentes de brotes que tienen señales ópticas coincidentes. Holger Pedersen, del Observatorio Meridional Europeo, se dedicó con tesón a la observación de una de ellas, y en el verano de 1979 vio recompensada su perseverancia. Detectó 15 brotes ópticos de la fuente MXB 1636-53, y cinco de ellos fueron simultáneamente registrados por el satélite japonés de rayos X *Hakucho,* bajo la dirección de Minoru Oda, de la Universidad de Tokio. (Cuando se detectaron los otros 10 brotes ópticos, *Hakucho* no estaba observando MXB 1636-53 o no podía transmitir los datos a la Tierra.) Durante un brote, la luz visible de MXB 1636-53 se triplica en unos segundos o menos; se produce con un retraso de unos 3,2 segundos respecto a la señal de rayos X. A partir de esos datos se puede establecer que el radio del disco de acumulación está comprendido entre 500.000 y un millón de kilómetros.

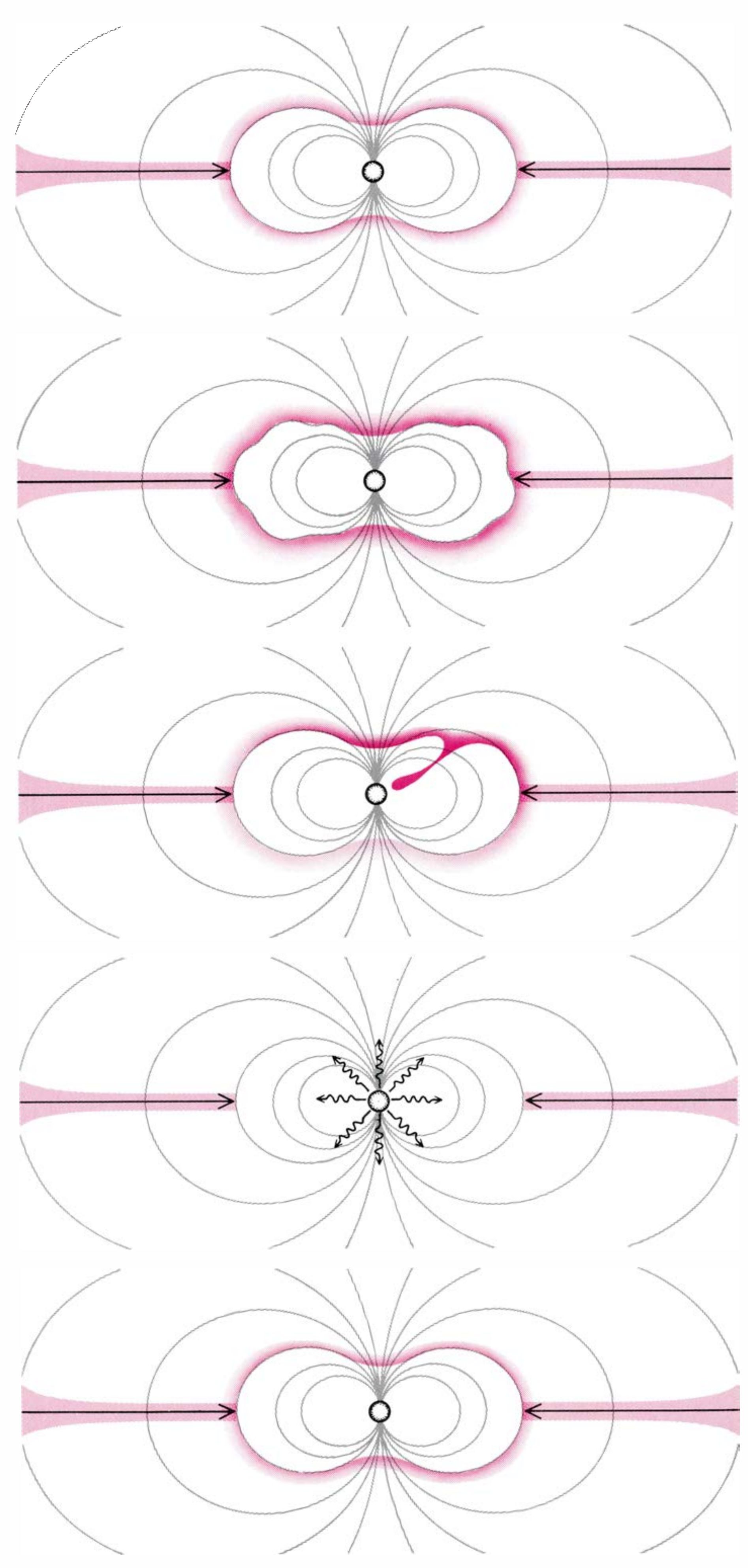
He insistido, hasta ahora, en el papel que los brotes de rayos X han desempeñado en el avance de nuestro conocimiento de las fuentes de rayos X de Clase 2: su naturaleza binaria y sus dis-

cos de acumulación que rodean a una estrella de neutrones. Hay que reconocer, sin embargo, que las pruebas de observación sólo apoyan la hipótesis de una estrella binaria en forma indirecta. Los espectros de los brotes eliminan otras hipótesis razonables acerca de la fuente de la materia en deposición que provoca la emisión continua de rayos X. Pero, ¿no existen pruebas más directas de que las fuentes de rayos X de Clase 2 sean sistemas binarios?

En ausencia de eclipses de rayos X, probablemente la indicación más directa que los astrónomos podrían esperar encontrar a favor del modelo binario sería la observación de la luz de la estrella compañera de pequeña masa. La luz procedente de las estrellas compañeras, muy luminosas y de gran masa, de los sistemas de Clase 1 se detecta fácilmente. Pero no lo es observar la luz de una estrella compañera de pequeña masa, porque la luz emitida por el disco de acumulación suele mostrarse mucho más intensa que la procedente de la propia estrella. A menos que la luz procedente del disco se pueda "apagar", de suerte que no enmascare la luz de la estrella, no es posible detectar la estrella de pequeña masa.

En principio, si el disco no es demasiado brillante, cabe distinguir la luz de la estrella de la emitida por el disco de acumulación. El espectro óptico de una estrella que consume combustible nuclear está interrumpido por líneas de absorción, porque la atmósfera de la estrella absorbe longitudes de onda particulares de la luz de la estrella. La absorción está indicada por líneas oscuras en el espectro de la estrella. El espectro óptico del caliente disco de acumulación difiere por completo. Tiene líneas de emisión, no líneas de absorción. Las líneas de absorción y de emisión resultan de transiciones entre niveles de energía en los átomos.

Hay varios objetos de Clase 2 en los que la luz emitida por el disco de acumulación se apaga a veces. Se llaman fuentes transitorias de rayos X o novas



RAPIDOS BROTES REPETITIVOS de la fuente de rayos X MXB 1730-355. Pueden resultar del "goteo" de materia sobre la superficie de una estrella de neutrones. En un modelo propuesto, la materia se acumula a lo largo de una superficie de fuerza magnética hasta que el campo magnético se torna incapaz de seguir soportando el peso. La materia entonces se filtra en una gota discreta y cae sobre la estrella, emitiendo rayos X mediante la liberación de energía potencial gravitatoria. La cantidad de materia en la gota varía: cuanto mayor resulta la gota, más dilatado el tiempo hasta que la masa se acumula nuevamente hasta el punto de romper el campo magnético. Lo que conducirá a la liberación de la siguiente gota de materia.

de rayos X; pueden aparecer bruscamente en el cielo como fuentes intensas de rayos X. No se corre peligro de confundirlos con los brotes porque se mantienen como intensas fuentes de rayos X durante días o meses, antes de que se extinga la emisión de rayos X. Una emisión relativamente brusca de rayos X suele alertar a los astrónomos sobre la existencia de una fuente transitoria. Como el aumento de intensidad de rayos X va acompañado del aumento de brillo de una estrella, que antes era débil y no destacaba, se puede identificar la contrapartida óptica. El aumento de brillo óptico resulta, presumiblemente, del calentamiento por los rayos X del disco de acumulación. A medida que los rayos X se atenúan gradualmente, el disco se enfría y su luz se debilita; la luz de la estrella compañera puede empezar entonces a predominar. Cuando aparecen las líneas negras de absorción en el espectro óptico, los astrónomos pueden estar razonablemente seguros de que están observando la compañera.

Pero esta escena se representó, por última vez, en mayo de 1979, con un brote de nova de la fuente de rayos X Centaurus X-4. La nova fue observada, mediante el satélite británico *Ariel V,* por Louis J. Kaluzienski y Stephen S. Holt, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard. Los investigadores pudieron determinar la posición de la fuente con un error de algunos grados. Los astrónomos ópticos hallaron luego que una modesta estrella en esta pequeña región del cielo había aumentado su brillo de una forma brusca y notable y que su espectro estaba dominado por líneas de emisión. A lo largo de un período de unas cinco semanas, a medida que la emisión de rayos X se atenuaba progresivamente, la estrella se hizo unas 100 veces más débil y retornó a su magnitud pretransitoria. Su espectro óptico presentó entonces líneas de absorción características de una estrella de unas 0,7 masas solares, lo que constituía un poderoso argumento a favor del modelo binario de pequeña masa.

Queda todavía una importante pieza del rompecabezas de los brotes de rayos X por colocar en su sitio. ¿Cuál es la naturaleza de los propios brotes? En la primavera de 1976, Laura Maraschi, de la Universidad de Milán, y Alfonso G. Cavaliere, de la Universidad de Roma, propusieron la hipótesis de que los brotes de rayos X se producían por reacciones nucleares de fusión no controladas, en la superficie de una estrella de neutrones. La idea de que los brotes resultaran de una gigantesca fulguración termonuclear fue sugerida, independientemente, por Stanford E. Woosley, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Ronald E. Taam, de la Northwestern University de Illinois, siguiendo el trabajo inicial de Carl J. Hansen, de la Universidad de Colorado en Boulder, y Hugh M. Van Horn, de la Universidad de Rochester. En 1978, Paul Joss publicó los primeros cálculos detallados, que describían una fulguración termonuclear en una estrella de neutrones; mostró, de forma convincente, que el modelo de la fulguración era, probablemente, el correcto.

El principio del modelo de la fulguración termonuclear es sencillo. El hidrógeno cae sobre la superficie de una estrella de neutrones, lo que resulta en la emisión continua de rayos X en virtud

ESPECTROS DE LA CONTRAPARTIDA OPTICA de Centaurus X-4 que establecen la masa de la compañera binaria de la estrella de neutrones emisora de rayos X en el sistema. Los espectros se registraron a finales de junio de 1979, aproximadamente un mes después de observarse el comienzo del aumento de brillo óptico. Estos espectros revelan la presencia de la débil estrella compañera, oscurecida antes por el brillante disco de acumulación. El disco se había enfriado y oscurecido al disminuir la emisión de rayos X durante las semanas que siguieron a la explosión inicial. Los espectros son típicos de estrellas de tipo espectrales *K3* a *K7*, lo que corresponde a estrellas de unas 0,7 masas solares. Los espectros fueron registrados por van Paradijs, Frank Verbunt, Theo van der Linden, Wamsteker y Pedersen.

de la liberación de energía potencial gravitatoria de la materia en descenso. El hidrógeno se acumula en la superficie y se transforma incesantemente en helio por fusión termonuclear. La capa de helio así constituida se dispone debajo de la de hidrógeno. Acumulados ya unos 10^{21} gramos, la temperatura y la densidad en la capa de helio pueden tornarse críticas; la fusión de los núcleos de helio para formar carbono puede ocurrir en una fulguración termonuclear. Esta genera el brote de rayos X. Los intervalos entre brotes dependen de la velocidad de deposición de masa sobre la estrella de neutrones y de la temperatura del interior de la estrella. Para una velocidad de deposición típica de 10^{17} gramos por segundo, el intervalo entre brotes duraría unas tres horas.

En su forma actual, el modelo de fulguración termonuclear ha servido para explicar muchas características de los brotes, aunque no todas. El modelo excluye los agujeros negros como fuente de brotes porque carecen de superficie sobre la que el material en descenso pueda acumularse y explotar. El modelo explica el rápido aumento del flujo de rayos X en el brote, los intervalos entre brotes, la temperatura observada de unos 30 millones de grados en el máximo del brote y el ulterior enfriamiento de un objeto con un radio de unos 10 kilómetros.

El modelo también da cuenta, en la mayoría de los casos, aunque no en todos, de la relación observada entre la energía nuclear liberada en los brotes y la energía gravitatoria liberada por deposición de materia. Un protón, o núcleo de hidrógeno, que cae sobre una estrella de neutrones de aproximadamente una masa solar ganará unos 100 millones de electronvolt (MeV) en energía cinética, que se liberará en forma de radiación en la región de rayos X del espectro. En la fusión del helio para formar carbono, la energía nuclear liberada es sólo de 1 MeV por partícula nuclear. Promediada respecto al tiempo, la energía en los brotes debería ser de aproximadamente una centésima parte de la energía liberada en el flujo continuo de rayos X. La relación observada de energías durante períodos de alta actividad de brotes es, con frecuencia, del orden de 1/100.

El modelo de fulguración termonuclear confirma nuestras primeras indicaciones de que las fuentes de rayos X de Clase 2 eran estrellas de neutrones. Según se desprende, pues, los objetos de rayos X de Clase 1 y los de Clase 2 son sistemas binarios, uno de cuyos miembros es una estrella de neutrones. ¿Por qué median entonces diferencias tan notables entre ambas clases? ¿Por qué, por ejemplo, sólo los objetos de Clase 2 producen brotes y por qué no son pulsantes? Y a la inversa, ¿por qué sólo los objetos de Clase 1 son pulsantes y no producen brotes?

La diferencia crucial entre los objetos de Clase 1 y los de Clase 2 es la masa de la estrella compañera. La compañera de gran masa en un objeto de Clase 1 debe ser relativamente joven; cabe pues esperar que la estrella de neutrones del sistema lo sea también. Hay razones para creer que una estrella de neutrones joven posee generalmente un intenso campo magnético. Un objeto de Clase 2 suele estar constituido por estrellas mucho más antiguas; el campo magnético de la estrella de neutrones más antigua ha ido debilitándose o bien el eje del dipolo se ha ido alineando con el eje de rotación. Como el campo magnético intenso es, según se cree, el mecanismo responsable de la concentración de la materia descendente sobre una zona caliente en rotación, los impulsos pueden ser emitidos por las jóvenes estrellas de neutrones en los objetos de Clase 1, pero no por las antiguas estrellas de neutrones en los de Clase 2. El intenso campo magnético de una joven estrella de neutrones (en un objeto de Clase 1) y la concentración de materia en los polos magnéticos inducen también a que el combustible nuclear se consuma de forma continua y no a borbotones. Quizás ahí resida la razón de que los brotes se observen sólo en los sistemas de Clase 2 y no en los de Clase 1.

La mayoría de los astrónomos no plantean ya serias objeciones al modelo de fulguración termonuclear. En los primeros días de su elaboración, sin embargo, mis colaboradores y yo descubrimos una fuente única de brotes de rayos X cuyas propiedades amenazaban con minar la teoría antes de establecerse. La nueva fuente, designada por MXB 1730-335, emitía brotes en rápida sucesión, con una frecuencia de varios miles de veces al día. Los distintos brotes podían diferir entre sí, en cuanto a energía, en un factor de 1000; lo que no dejaba de contrastar con los brotes procedentes de otras fuentes, que diferían entre sí en un factor no mayor de 10. Recuerdo bien mi entusiasmo por el modelo de fulguración cuando, en febrero de 1976, me lo expuso Maraschi por primera vez. Un mes más tarde, sin embargo, cuando descubrimos la Fuente de Tiro Rápido, el entusiasmo se tornó en escepticismo. Los brotes repetitivos, que se produ-

cían como fuego de ametralladora, no podían provenir de fulguraciones termonucleares.

Aunque la Fuente de Tiro Rápido parecía el rompiente de la teoría, 18 meses más tarde se convirtió en la piedra angular de nuestros esfuerzos por desentrañar los brotes. En el otoño de 1977, Hoffman, Herman L. Marshall (uno de mis discípulos) y yo detectamos una clase "especial" de brotes en la Fuente de Tiro Rápido. Los brotes especiales tenían un aspecto muy diferente del de los brotes rápidos, pero se asemejaban sospechosamente a los de las demás fuentes de rayos X. Se emitían cada tres o cuatro horas, su duración e intensidad eran aproximadamente las mismas durante todo el período de observación y la energía de sus rayos X decrecía más deprisa para altas energías que para las bajas.

Separadas ya las dos clases de brotes en la Fuente de Tiro Rápido, volvió a adquirir interés la idea de la fulguración termonuclear. Resultaba atractivo suponer que los brotes especiales se debían a fulguraciones termonucleares y los brotes rápidos repetitivos a inestabilidades en la velocidad de deposición.

Por la época en que se descubrió la Fuente de Tiro Rápido se sospechaba ya de inestabilidades en el flujo de materia depositada. Debido a un campo magnético circundante, o por algún otro motivo, la materia parece caer sobre la fuente de Tiro Rápido en gotas, y no de forma continua. Se elimina una acumulación constante de materia sobre la superficie de la estrella cuando se alcanza cierto punto crítico; la cantidad de materia liberada determina el intervalo de tiempo antes de que el punto crítico se alcance de nuevo. Comportamiento que recuerda el del grifo de agua que gotea. Se llama oscilador de relajación al sistema que reúne esas características.

Para comprobar nuestra hipótesis, medimos la energía liberada en los brotes rápidos y la comparamos con la energía liberada en los brotes especiales. Si estos últimos fueran fulguraciones termonucleares y, los brotes rápidos, resultado de un mecanismo de "goteo" que sustituyera a la deposición continua ordinaria, la relación de energías debería ser del orden de 1/100. La relación que encontramos fue 1/120, lo que concordaba convincentemente con el modelo.

Así pues, la "particularidad" de los brotes especiales se circunscribía a la Fuente de Tiro Rápido. Los brotes especiales son los brotes corrientes de rayos X de todas las demás fuentes de brotes. Este descubrimiento, obtenido en el otoño de 1977, supuso un viraje en nuestro enfoque del problema. Antes incluso de que Joss pulicase sus cálculos, el hallazgo hizo del modelo de fulguración termonuclear algo casi obligatorio.

El misterio de las fuentes de brotes de rayos X parece, en su mayor parte, desvelado. Quedan, en pie, sin embargo, varias cuestiones por resolver. ¿Cuál es la naturaleza de la inestabilidad en la deposición que produce la infrecuente cadencia de la Fuente de Tiro Rápido? ¿Por qué ésta no se observa en la radiación de otras fuentes de rayos X? ¿Por qué la Fuente de Tiro Rápido cesa periódicamente de producir brotes, para tornarse luego activa, a intervalos de seis meses? ¿Cómo se forman los sistemas binarios de Clase 2? George W. Clark, del MIT, ha explicado la formación de los objetos de Clase 2 que se hallan en los cúmulos globulares como resultado del paso muy cercano de una estrella de neutrones y una estrella que consume combustible nuclear. Pero muchos objetos de Clase 2 no están en cúmulos globulares. ¿Cómo se formaron, pues, esos sistemas binarios?

A pesar de los problemas pendientes, el conocimiento de las fuentes de rayos X de Clase 2 ha avanzado un largo camino. Seis años atrás, las fuentes eran un oscuro enigma y la existencia de brotes de rayos X, desconocida. Ya sabemos qué son las fuentes y cómo producen los brotes. Estos, a su vez, suministran una nueva y poderosa herramienta para estudiar las propiedades de las estrellas de neutrones, sus discos de acumulación y los sistemas binarios de pequeña masa donde suelen localizarse.

Existe el peligro de que el trabajo en esa nueva rama de la astronomía se detenga en esta década. De momento, sólo el observatorio orbital japonés de rayos X *Hakucho* puede realizar observaciones de brotes de rayos X en coordinación con observadores terrestres. Al satélite le restan, probablemente, sólo unos pocos años de vida activa. Se espera que la Oficina Espacial Europea lance el Observatorio Europeo de Rayos X (*EXO-SAT*) en 1982. La NASA puede en breve aprobar sus planes ya existentes para el satélite Explorador y Cronometrador de Rayos X (*XTE, X*-Ray *T*iming *E*xplorer). Este observatorio de rayos X se adaptaría, en principio, al estudio de múltiples fenómenos altamente variables.

Ciencia y sociedad

La parasitología hoy

Varios centenares de científicos españoles trabajan en temas relacionados con la parasitología, en universidades y centros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), cubriendo muy amplios campos de esta ciencia, con variable intensidad, según sus motivaciones personales o profesionales. Un análisis de la composición profesional del colectivo que forman los parasitólogos en España y el estudio de los temas que les preocupan arroja cierta luz sobre la evolución de esta ciencia y, aunque parezca extraño, sobre el desarrollo de la propia sociedad española en los últimos años.

Efectivamente, en la primera mitad del siglo actual, la mayoría de los trabajos españoles tenían relación con enfermedades del hombre, mientras que en los últimos veinticinco años sólo un 12,0 por ciento tiene como eje un problema patológico humano. Los progresos de la sanidad y la mejora cualitativa y cuantitativa del nivel de vida en la sociedad española han eliminado, o reducido en importancia, muchas de las parasitosis humanas asociadas al subdesarrollo y a las deficiencias higiénicas que lo acompañan. Sin embargo, todavía quedan bolsas de pobreza entre nosotros, en las que pueden diagnosticarse parasitosis con prevalencia e intensidad elevadas. Incluso en zonas urbanas no han desaparecido algunas plagas que parecían definitivamente extinguidas. Citemos la invasión de piojos de los últimos años entre las poblaciones escolares.

La disminución real del problema parasitario del hombre en España ha llevado aparejada una mengua en el interés de los profesionales de la medicina por la parasitología, hasta extremos que pueden considerarse excesivos. Al lado de algunas zoonosis que todavía tienen presentación frecuente (verbigracia, la hidatidosis), no han desaparecido de nuestro territorio otras muy significativas, como la leishmaniosis, que sigue afectando a extensas áreas de la costa mediterránea y del interior y que, en ocasiones, ha merecido lugares destacados en la prensa sensacionalista europea, interesada en poner de relieve los peligros del veraneo en España. Por supuesto, también menudean los trabajos médicos y veterinarios, al norte de los Pirineos, que hacen referencia a la adquisición de leishmaniosis con ocasión de viajes a nuestro país.

Otras zoonosis parasitarias han sido investigadas entre nosotros satisfactoriamente, y no sólo las que, por razones que casi podían calificarse de *modas* (v.g., la toxoplasmosis), han atraído a clínicos y parasitólogos. Nos parecen dignos de destacarse los trabajos relativos a los ciclos silváticos de *Trichinella spiralis* en la cordillera cantábrica (Asturias y León) y los que han permitido identificar *Trichinella nelsoni* en Galicia, fundamentales para explicar la frecuencia de la parasitosis en los cánidos silvestres y su rareza en los círculos sinantrópicos gallegos y portugueses.

Ni han desaparecido las parasitosis humanas plenamente, ni tenemos garantizada una situación de protección frente a otras que, por el momento, no se diagnostican entre nosotros. Téngase en cuenta que muchos procesos parasitarios están vinculados a factores etológicos y que el propio fenómeno del turismo puede introducir, por ejemplo, hábitos culinarios y gastronómicos que hagan posible la aparición de problemas que ahora son prácticamente inexistentes, mas para los que existen en nuestro ambiente natural las condiciones precisas para su aparición. Citemos la botriocefalosis y las anisakiosis. El propio fenómeno de la movilidad de las poblaciones humanas, incluyendo en él las migraciones, puede ser origen de casos "raros" de diagnóstico difícil, simplemente porque no se piensa en la existencia de la enfermedad, por considerarla exótica. En repatriados de Africa y de diversos países americanos pueden diagnosticarse casos de bilharziosis, oncocercosis, etc., según nuestra propia experiencia, después de largos recorridos por clínicas médicas dotadas de excelentes instrumentales y equipos humanos, simplemente por no haberlas incluido entre las de posible diagnóstico diferencial.

Como signo cambiante de la orientación de la parasitología, podemos interpretar el creciente interés veterinario por esta ciencia. Es verdad que, desde el punto de vista clínico y sanitario, los veterinarios siempre tuvieron conciencia del papel de las parasitosis. Pero la mayor preocupación ha venido de la mano del cambio en las estructuras productivas, que ha acompañado a la aparición de la nueva zootecnia. Aproximadamente un tercio de los trabajos de parasitología españoles son de procedencia veterinaria. En muchos de ellos, implícita o explícitamente, hay un substrato económico, debido a que la producción moderna de las especies domésticas y útiles, cada vez más, se analiza con criterios empresariales.

El interés farmacéutico por la parasitología, aparte de las razones vinculadas a la preparación de fármacos, tiene en España una tradición que arranca del profesor López-Neyra, cuyo nombre lleva en Granada el antiguo Instituto Nacional de Parasitología. Hasta un 44 por ciento de la producción científica española tiene raíces farmacéuticas. Un puesto injustificadamente menos importante ocupan los trabajos nacidos en las Facultades de Biología (21 por ciento), sin duda motivados por la tradición zoológica pura que ha venido imperando en algunas escuelas. De todos modos, la tendencia es de fuerte incremento.

En otro orden de cosas, el enfoque de los trabajos también ha ido modificándose de modo progresivo. Como tarea inicial y básica, se acometió la preparación del *Indice-Catálogo de Zooparásitos Ibéricos* (Cordero del Campillo, M. y cols., Ministerio de Sanidad y Seguridad Social, Madrid, 1980), para el que se consultaron 2646 trabajos relativos a la Península Ibérica e islas dependientes, con el resultado de señalar la existencia de 240 especies de protozoos, 177 de tremátodos, 182 de cestodos, 366 de nemátodos, 23 de acantocéfalos, 19 de anélidos, 33 de crustáceos, 144 de malófagos, 23 de anopluros, 82 de sifonápteros, 373 de dípteros y 223 de acarinos, más unas cuantas especies más, a recoger en un capítulo misceláneo, que aún no ha visto la luz. Este fruto de la cooperación de expertos nacionales y extranjeros representa una sólida base para el conocimiento de la parasitología nacional y constituye un boceto de mapa parasitario, dado que figuran las áreas donde se han identificado y la gama de hospedadores sobre los que se han recogido las especies parásitas.

Aparte de estos aspectos relacionados con la faunística, los parasitólogos españoles, conscientes de que los aspectos zoológicos de la vida parasitaria sólo son una pequeña parte del fenómeno del parasitismo, cuya esencia representan las relaciones *parásito/hospe-*

dador, enmarcadas en un determinado medio ambiente, han dedicado también sus esfuerzos a la investigación de la fisiología y bioquímica de los parásitos, incluso en cultivos axénicos, para conocer las vías metabólicas, los productos antigénicos segregados y una serie de datos básicos sobre los parásitos, que permitan aprovecharlos para descubrir métodos diagnósticos, o racionalizar el ensayo de antiparasitarios, por no citar sino un par de posibles aplicaciones.

En ocasiones, todavía puede detectarse casi una obsesión médica-farmacéutica-veterinaria en este tipo de estudios. De una parte, como resultado del hábito de considerar primordialmente a los parásitos como un flagelo que azota al hombre directamente, o como una plaga de las plantas y animales cultivados en su provecho directo. Por otra parte, subyacen razones de volumen de mercado para determinados productos de la industria químico-farmacéutica. Pero, con todo, el marco tiende a dilatarse hacia la investigación de problemas biológicos básicos, o en dirección hacia los aspectos ecológicos del parasitismo.

En esta última dirección apuntan los trabajos que superan el enfoque del problema del parasitismo como una relación de carácter individual ("un" parásito –o especie parásita– en "un" hospedador, es decir, el sistema idiohostálico), hacia el entendimiento de que se trata de relaciones entre poblaciones de parásitos, que viven en poblaciones de hospedadores (sistema sinhostálico), en un determinado territorio, sometido a condiciones climáticas y de otra naturaleza que entran en lo que globalmente llamamos medio ambiente. Es obvio que la complejidad del problema exige una sólida preparación para abordarlo en su integridad; de ahí que los equipos científicos multiprofesionales sean la regla en este tipo de estudios, sin que falte nunca un experto en el tratamiento estadístico de los resultados.

La cinética de las poblaciones de parásitos y de hospedadores depende de numerosos factores y su indagación puede aportar información de aplicación inmediata a la prevención y lucha contra las parasitosis, particularmente en los sistemas productivos ganaderos. Incluso las relaciones interespecíficas que se dan en los poliparasitismos pueden ser interesantes, ya que son bien conocidos los fenómenos de incompatibilidad, sinergia o indiferencia entre algunas especies parásitas que comparten un mismo órgano. Respecto al hospedador, la especie concreta, la edad, el sexo y la utilización del espacio disponible, por los diversos grupos de animales, así como los sistemas de aprovechamiento de los recursos agrarios, tienen directa repercusión en la población parasitaria. Añádase el clima, el papel del suelo y la misma localización geográfica y se tendrá un esquema de las principales coordenadas que centran este tipo de investigaciones.

Trabajos llevados a cabo en la región leonesa (León-Salamanca), centrados en la especie ovina, han permitido conocer con cierto detalle la secuencia estacional de la eliminación de formas parasitarias de coccidios, tricoestrongílidos y protostrongilinos, así como el papel que algunas actividades zootécnicas (la "gestión", del inglés "management") tienen en ello. Es bien sabido que el hombre es el gran alterador de la naturaleza; y, sin duda, agricultura y ganadería figuran entre las actividades humanas que más contribuyen a modificar el medio natural. En lo que se refiere a las parasitosis, se corrobora claramente esta afirmación, pues la comparación de lo que sucede con rebaños mantenidos en condiciones primitivas y la realidad en las explotaciones de aprovechamiento intensivo es muy dista. A medida que el hombre interfiere en la naturaleza, los mecanismos de regulación de las poblaciones parasitarias se alteran y tienden a acomodarse a las nuevas condiciones.

Mención especial merecen los estudios que intentan establecer relaciones entre clima y parasitosis, iniciados en Gran Bretaña y extendidos por otros países, entre los que figura España. Se dice que la cooperación entre meteorólogos y parasitólogos puede ser muy fructífera, y ciertamente hay razones para ello. Basándose en parámetros como la pluviosidad, la temperatura y la evaporación, han podido establecerse bioclimatógrafos que, si no tienen una aplicación general, son suficientemente útiles. En algunos casos, fórmulas matemáticas permiten predecir cuándo son de esperar riesgos de epizootias y, por lo tanto, anticipar las medidas antiparasitarias precisas para anular sus efectos o paliarlos. Trabajos de este tipo se han realizado en la cuenca del Duero, Extremadura y Castilla la Nueva, al menos.

No podemos concluir sin hacer mención a un campo relativamente nuevo entre nosotros, pero que está avanzando considerablemente. Nos referimos al estudio de las parasitosis de los peces continentales de España, tanto en los espacios naturales como en piscifactorías industriales. Iniciados hace ya unos diez años con carácter sistemático en León, van extendiéndose por otras áreas ibéricas, ante la creciente atención que atrae la producción de peces, vistas las dificultades de las capturas marítimas. Creemos que las variadísimas condiciones ecológicas de la Península y la existencia de suficientes espacios abiertos aún sin contaminar permiten predecir un fuerte desarrollo de esta industria, para la que será de mucha utilidad el conocimiento de las parasitocenosis existentes en ríos y embalses. Desde otro ángulo, el conocimiento de las especies parásitas existentes en nuestros sistemas fluviales puede ser útil para detectar posibles modificaciones futuras debidas a contaminación de los cursos de agua. No olvidemos que los parásitos forman parte también de las cadenas tróficas y, por tanto, intervienen también en los flujos de energía. La posible acción de los agentes contaminantes sobre los parásitos, o sus hospedadores intermediarios, cuando existen, podría constituir un indicador de fácil comprobación. (Miguel Cordero del Campillo.)

Números romanos

Se ha dicho en más de una ocasión que las ciencias exactas modernas serían inconcebibles sin el sistema de numeración arábigo. Los cálculos con cifras romanas, a no ser que se trate de operaciones muy simples, se presentan como demasiado engorrosos. En particular se ha considerado que la notación romana de la multiplicación y división de números grandes resultaba excesivamente torpe. James G. Kennedy, de la Hughes Aircraft Company, señala que en cierto modo se ha exagerado la falta de agilidad de los guarismos romanos. La realidad es que los algoritmos para multiplicar y dividir son más simples en el sistema romano que en el arábigo.

El sistema de numeración arábigo se originó probablemente en la India, y no en Arabia. Su elemento capital, el cero, fue incorporado posteriormente. Se trata de un sistema posicional decimal, es decir, en el que se sobreentiende que las cifras de un número, leídas de derecha a izquierda, están multiplicadas por las sucesivas potencias de 10. El sistema romano no es posicional, sino que cada símbolo representa una cantidad fija con independencia del lugar que ocupa. Sin embargo, parece ser que en su forma original era decimal. En esta primera versión los números de 1 a 9 se

representaban por concatenaciones de la letra I, mientras que por cada potencia de 10 se introducía un nuevo símbolo: la X representa 10; C, 100; y la M, 1000. Se cree que los símbolos V, L y D, que representan 5, 50 y 500 respectivamente, fueron introducidos por los etruscos; aunque permiten representar números de una forma más compacta, complican también la aritmética.

Kennedy presenta sus algoritmos para multiplicar y dividir números romanos en la revista *The American Mathematical Monthly*. Para multiplicar dos números, el primer paso consiste en reescribir los números en una notación posicional simple. Se introducen siete columnas, encabezadas por los símbolos M, D, C, L, X, V e I, respectivamente; en cada una de ellas, se marcan tantas señales cuantas veces aparezca el correspondiente símbolo en el multiplicando. Por ejemplo, si el multiplicando es XIII (13), se marcará una señal en la columna de la X y tres señales en la de la I. El multiplicador se escribe de la misma manera.

¿Cómo se multiplica? Así: formando productos parciales de acuerdo con dos reglas simples. En la mayoría de los casos, el producto parcial generado por una señal cualquiera del multiplicador es simplemente el resultado de desplazar hacia la izquierda el conjunto de señales del multiplicando un número apropiado de columnas. Si la cifra del multiplicador es I, no se efectúa ningún desplazamiento; se corre un lugar a la izquierda para la cifra V; dos para la X; tres para la L; y así sucesivamente. La segunda regla, que en realidad es sólo una modificación de la primera, se aplica sólo cuando un signo etrusco (V, L o D) se multiplica por otro signo etrusco. En este caso las señales bajo el signo del multiplicando se escriben dos veces en la columna desplazada y se escribe una señal adicional en la columna inmediatamente a la derecha. Sin esta modificación V × V sería X, pero con ella es igual a XXV (25), que es el resultado correcto. Una vez formados todos los productos parciales, uno por cada señal del multiplicador, se acumulan las señales de cada columna y se reemplazan por el signo romano que encabeza la columna. La sucesión de signos resultante representa el producto de los dos números. Véase la figura adjunta en donde se ilustra el procedimiento con el producto 17 × 61 = 1037 utilizando puntos como signos convencionales para los productos parciales.

Para multiplicar números romanos escritos en "notación sustractiva", en la que 4 se escribe IV y 90 se escribe XC, sólo se necesita un procedimiento algo más complicado en el que algunas de las señales se contarán como cantidades negativas. Los problemas de división se pueden resolver por medio del mismo formato posicional. En esencia, el algoritmo de división consiste en correr el divisor tantas veces hacia la izquierda como sea posible sin que exceda al dividendo. Entonces el divisor así desplazado se sustrae tantas veces como sea posible del dividendo, marcando, para cada sustracción, una señal para el cociente.

Aunque estos algoritmos no parecen especialmente simples, debiera tenerse en cuenta que las reglas para multiplicar y dividir números arábigos serían también bastante complejas si se hicieran explícitas en forma escrita. Además, para las operaciones arábigas se precisa, al lado de los algoritmos, una tabla de multiplicar que dé los 100 productos de todos los pares posibles de dígitos. Una tal tabla es innecesaria para los números romanos, donde todas las operaciones aritméticas pueden ser definidas en términos de reglas de desplazamiento, de la suma y de la resta.

La simplicidad formal de los algoritmos para números romanos no es razón para volver a la notación romana. El hecho de que las reglas sean simples no significa necesariamente una utilización más sencilla. La existencia de tales algoritmos tampoco se puede emplear para sopesar la capacidad de cálculo de los usuarios del sistema romano. En palabras de Kennedy: "Los romanos contaban ordinariamente por medio del ábaco o mesa de contar. Los métodos que utilizaron para cálculos escritos, si es que tuvieron alguno, se han perdido y los métodos aquí descritos podrían ser un invento moderno".

	M	D	C	L	X	V	I	
MULTIPLICANDO				•	•		•	LXI
MULTIPLICADOR					•	•	••	XVII
				••	••		••	
PRODUCTOS PARCIALES			••	••		•		
		•	•		•			
PRODUCTO		D	CCC	LLLL	XXX	V	II	= MXXXVII

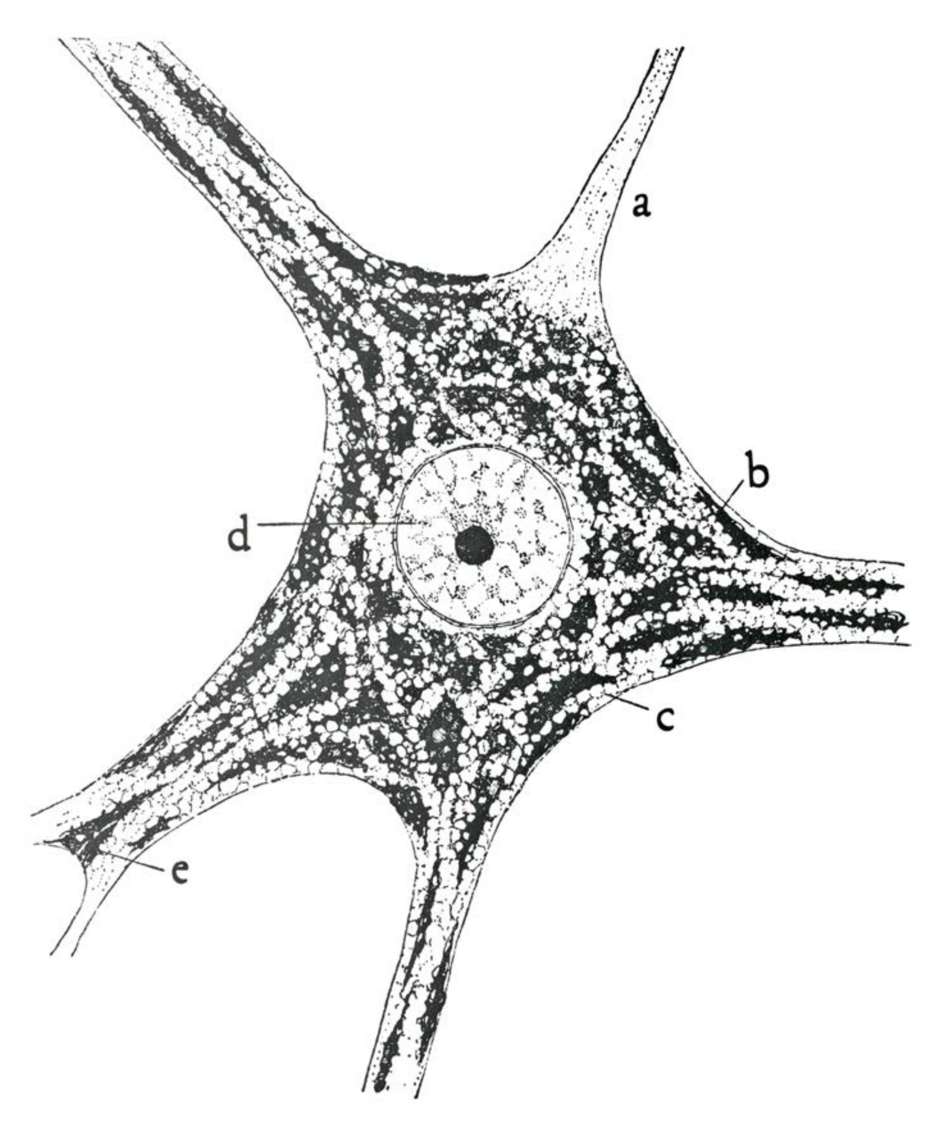
Los puntos de los productos parciales se han dispuesto en la parte inferior de los recuadros excepto para el único producto de dos signos etruscos (V × L en el segundo producto parcial) que se han colocado en la parte superior. Por claridad se han representado en colores distintos los productos parciales. Cada uno de los puntos en rojo del multiplicador deja el multiplicando inafectado. El punto azul desplaza los puntos bajo I y X una columna a la izquierda, mientras que transforma el punto bajo L en dos puntos bajo C más un punto bajo L (producto de dos signos etruscos). El punto verde desplaza el multiplicando dos lugares a la izquierda

Historia de la célula

La profesora del Departamento de Morfología y Microscopía de la Universidad de Barcelona, Mercedes Durfort, nos remite unas puntualizaciones que creemos constituyen una buena introducción al artículo que Investigación y Ciencia publicó en mayo sobre "El armazón celular".

En el período de tiempo comprendido entre 1665, fecha en que Hooke empleó por primera vez el vocablo célula, y 1930, citólogos e histólogos de diversas nacionalidades, tras la aplicación de técnicas de fijación adecuadas, tinciones e impregnaciones, describen y dan hipotéticas funciones a múltiples estructuras celulares: núcleo (Brown, 1831; Fontana, 1949; Flemming, 1853), nucléolo (Wagner, 1832), cromosomas (Waldeyer, 1874), mitocondrias (Altmann, 1885; Benda, 1897; Meves, 1907), plastos (Meyer, 1883) (Schimper, 1879-1885), centriolo (van Beneden, Levi, Pensa), aparato reticular interno (Golgi, 1898; Fusari, 1899; Ramón y Cajal), ergastoplasma (Garnier y Bouin), vacuolos (Sachs, 1879; Guilliermond, 1930-1935; Dangeard), estructuras fibrilares de la fibra muscular lisa y de la estriada, así como de la célula nerviosa (Henle, 1845; Kölliker, 1860; Retzins, 1880; Ramón y Cajal, 1880; Sánchez, 1920.)

La célula hacia los años treinta era considerada como algo más que "una pequeña bolsa de líquido con unas cuantas estructuras...".



Célula motriz de la médula espinal del conejo. Coloración por la tionina. —a, *cilindro-eje;* b, *grumo cromático;* d, *núcleo;* c, *espongioplasma;* e, *masa de bifurcación (Santiago Ramón y Cajal,* **Manual de Histología Normal;** *Madrid, 1905)*

El avance y la información conseguida gracias al elevado poder de resolución del microscopio electrónico no sólo han sido considerables, sino revolucionarios. Se han obtenido datos que aportan una nueva imagen de las estructuras conocidas, éstas han sido redescubiertas y ha sido posible comprender mejor su funcionalidad, a la vez que se han podido visualizar una serie de estructuras que por su pequeño tamaño no se apreciaban al microscopio óptico, tales como la membrana citoplasmática, extremadamente delgada (de 75 a 100 angstrom), los peroxisomas, los lisosomas, los ribosomas, gránulos inter e intracromatínicos, la cromatina (estructura del nucleosoma), estructuras axonemáticas, etcétera.

Si bien cabe hacer una matización al respecto de algunas de las estructuras que acabamos de relacionar. Con el microscopio fotónico no se podía visualizar un ribosoma, pero sí se apreciaban los agregados de ribosomas que, libres por el citoplasma o adheridos al retículo endoplasmático, eran responsables de la basofilia que presentaban numerosos modelos celulares, principalmente aquellas células sintetizadoras. Basofilia que permitió a Garnier describir áreas más o menos extensas y relacionarlas, a su vez, con procesos de síntesis (1897).

De la misma manera que el microscopio electrónico de elevada aceleración ha permitido poner de manifiesto, tras el empleo de técnicas adecuadas de fijación y contrastado, el endocitoesqueleto o "armazón celular" (según el traductor del trabajo que comentamos), no dudamos que la información de que se dispondrá dentro de cincuenta años será mucho más exhaustiva y permitirá despejar algunos de los interrogantes que tiene planteada la biología celular, a la vez que indudablemente habrán surgido otros.

La cresta de la dorsal del Pacífico oriental

La exploración submarina de una zona de una dorsal mesoceánica, donde fuentes termales del fondo oceánico permiten el desarrollo de una comunidad biológica, ha revelado cómo emergen nuevos segmentos de corteza terrestre

Ken C. Macdonald y Bruce P. Luyendyk

La dorsal del Pacífico oriental forma parte de la cadena montañosa más larga del mundo: el sistema oceánico de valles de fractura (rifts) de 75.000 kilómetros de longitud que circunda el planeta como la costura de un balón. La mayor parte del sistema de valles de fractura, incluida toda la dorsal del Pacífico oriental, es submarina; constituye una red de dorsales mesoceánicas. En la teoría de la tectónica de placas, que se ha convertido en el principio organizador de la geología, el sistema de valles de fractura tiene un papel vital. Cada valle es una zona fracturada y angosta, donde placas de corteza oceánica se ven forzadas a acercarse o a separarse continuamente. En este centro de expansión del fondo oceánico mana roca fundida del manto terrestre; ésta rellena grietas y genera nuevos segmentos de corteza oceánica, que se desplazan hacia afuera como si estuvieran montados sobre una ancha cinta transportadora.

La noción de expansión del fondo oceánico permite explicar numerosas observaciones geológicas. Con todo, siguen sin respuesta algunas preguntas de importancia acerca del sistema de valles de fractura. Fotografías submarinas y muestras de rocas revelan actividad volcánica reciente en las dorsales mesoceánicas, lo cual induce a pensar que, bajo el eje de la dorsal, hay una cámara magmática, un depósito de roca fundida. ¿Es esa cámara magmática, acaso, una característica permanente de la dorsal? Y si lo es, ¿qué profundidad alcanza? ¿Hasta qué distancia del eje se extiende? ¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas del magma? ¿Cuánto calor del interior de la tierra se pierde en la creación volcánica de corteza nueva? Las respuestas a estas preguntas y a otras similares podrían mejorar mucho la comprensión de la estructura y la composición de la corteza terrestre, ya que al menos el 70 por ciento de la corteza se ha formado en esos valles mesoceánicos.

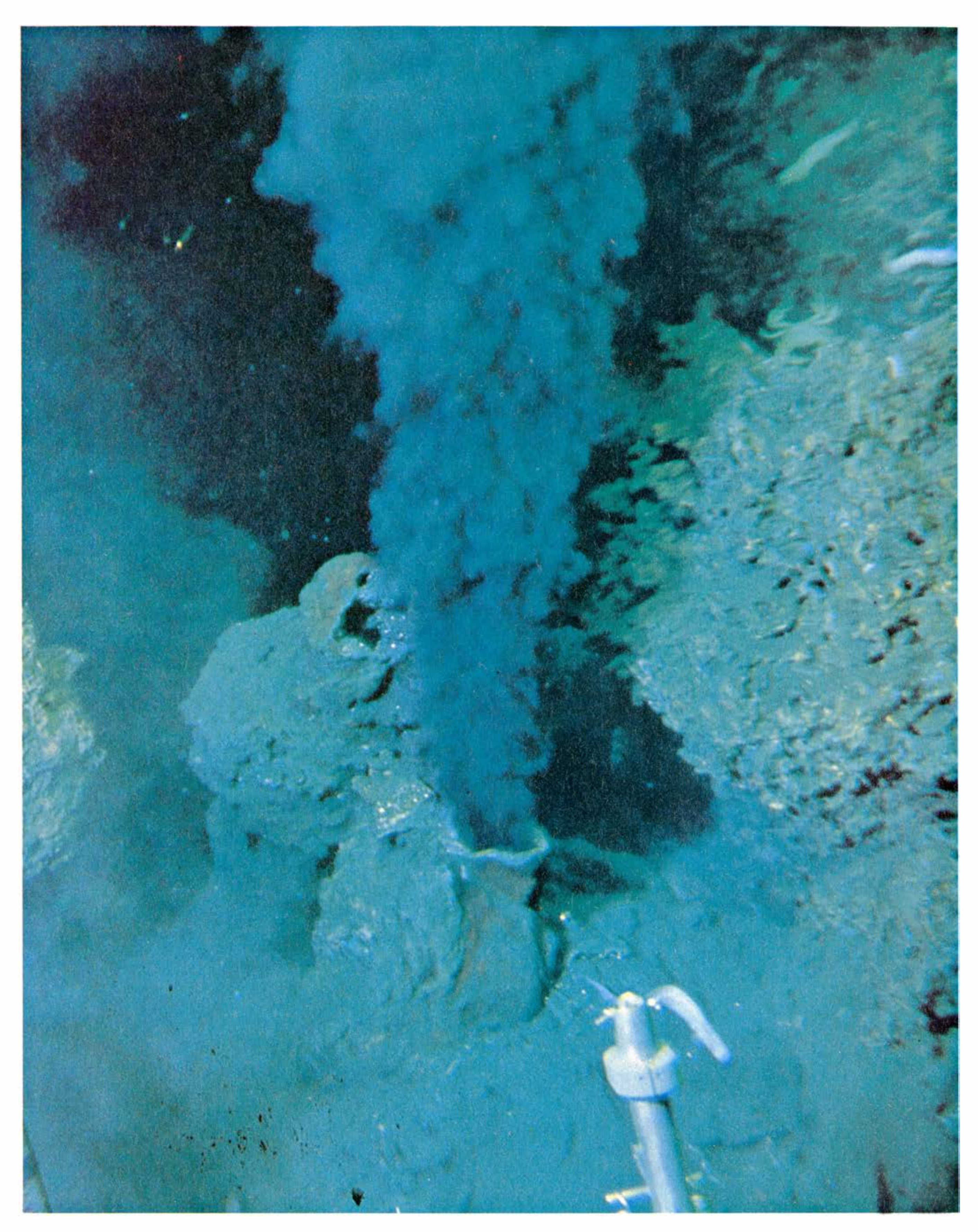
Recientemente, con un grupo de nuestros colaboradores, tuvimos la oportunidad de explorar de cerca una pequeña región de la cresta de la dorsal del Pacífico oriental. La expedición nos deparó nuevos y valiosos indicios sobre una cámara magmática existente a lo largo del eje de la cresta y sobre una zona estrecha y bien delimitada de formación cortical encima de la cámara. Las pruebas proceden de mediciones de propiedades sísmicas, eléctricas, gravimétricas y magnéticas de la corteza, así como de detallados mapas geológicos obtenidos en travesías por la zona volcánica axial. Las pruebas más espectaculares se lograron en observaciones visuales directas, desde un pequeño vehículo sumergible, hasta más de dos kilómetros y medio de profundidad. En distintos puntos de la cresta hallamos grupos de fuentes hidrotermales de las que manaba un agua mineral negruzca que había sido calentada a temperaturas extraordinariamente elevadas por contacto con rocas próximas a una cámara magmática. Resulta que las fuentes hidrotermales ejercen gran influencia no sólo en la geofísica del sistema de valles de fractura, sino también en el equilibrio químico de los océanos. Además, los manantiales permiten el desarrollo de una comunidad biológica excepcional, la única conocida que es totalmente independiente de fuentes fotosintéticas de energía.

Tectónica de placas

La teoría de la tectónica de placas describe los movimientos de la litosfera, la capa exterior, relativamente rígida, de la tierra que comprende toda la corteza y parte del manto subyacente. La litosfera está dividida en unas cuantas docenas de placas de tamaño y forma diversos; en general, las placas se mueven unas respecto a otras. Una dorsal mesoceánica marca el límite entre placas donde, desde abajo, se inyecta nuevo material litosférico. A medida que se van alejando de una dorsal mesoceánica, las placas se deslizan sobre una capa más blanda situada en la base de la litosfera.

El tamaño de la tierra se mantiene esencialmente constante; por consiguiente, sólo podrá crearse litosfera nueva en las dorsales mesoceánicas si en alguna otra parte se consume un volumen equivalente de material litosférico. El lugar donde se produce esta destrucción es otro tipo de borde de placa: una zona de subducción. Aquí, una placa se sumerge bajo el borde de otra y se reincorpora en el manto. Ambos tipos de borde de placa están asociados a sistemas de fallas, terremotos y vulcanismo, si bien la actividad geológica observada en los dos tipos de bordes es completamente distinta.

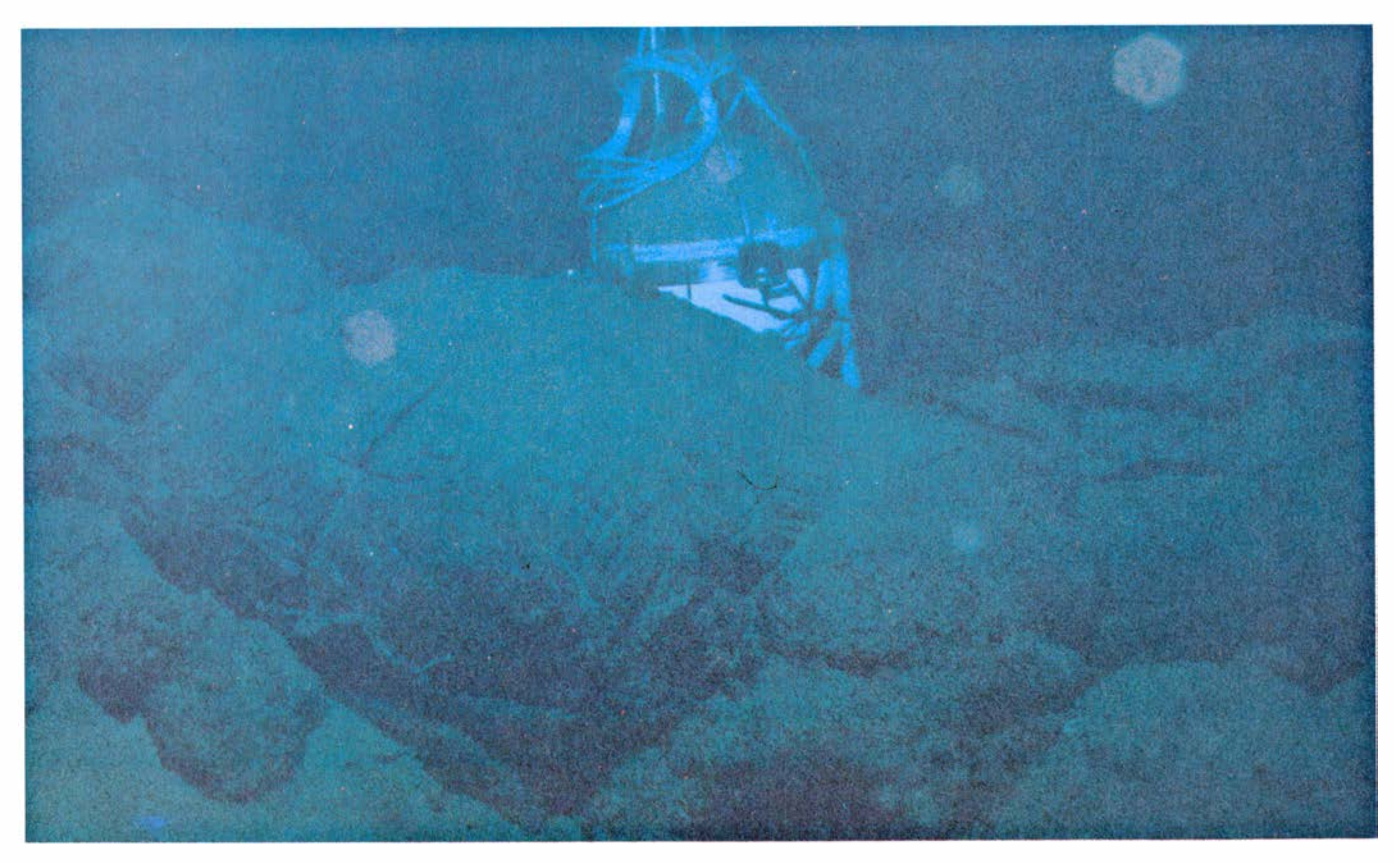
A la teoría de la tectónica de placas le había precedido la idea de la expansión del fondo oceánico, hipótesis formulada principalmente por Harry H. Hess, de la Universidad de Princeton, a principios de la década de 1960. En su versión original, describía la creación y destrucción del fondo oceánico, pero no especificaba placas litosféricas rígidas. Poco tiempo después, la hipótesis se vio apoyada por el descubrimiento de que, en la corteza oceánica, están registradas inversiones periódicas del campo magnético terrestre. Hoy se acepta de forma generalizada una explicación de este proceso desarrollada



DE UN "HUMERO NEGRO" de la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, cerca de la boca del golfo de California, mana agua caliente, ennegrecida por sulfuros. La fotografía se tomó desde el sumergible oceanográfico tripulado *Alvin*, a 2650 metros de profundidad; en primer término, puede verse una parte del equipo tomatestigos del sumergible. La dorsal del Pacífico oriental es un límite entre dos placas de litosfera terrestre (capa que comprende la corteza rocosa) en el que ambas se separan. En él penetra agua marina fría, a través de la corteza relativamente delgada; se calienta por contacto con magma (roca fundida) bajo el centro de expansión del fondo oceánico. El agua sale de las fumarolas a temperaturas de hasta 350 grados Celsius, cargada de minerales que sustentan una comunidad biológica. El lugar fue explorado en 1979 por un equipo de inmersión que incluía a los autores y a otros 19 investigadores de los Estados Unidos, Francia y México. Los demás miembros del equipo eran Fred N. Spiess, Charles S. Cox, James W. Hawkins, Rachel Haymon, J. Douglas Macdougall, John A. Orcutt, Loren Shure, Tanya M. Atwater, Stephen P. Miller, Robert D. Ballard, Jean Francheteau, T. Juteau, C. Rangin, R. Larson, William R. Normark, A. Carranza, V. M. Díaz García, D. Córdoba y J. Guerrero. La fotografía es de D. Foster, de Woods Hole.



ANIMALES RAROS junto a las fumarolas hidrotermales de la dorsal del Pacífico oriental. Entre ellos se cuentan muchos organismos iguales a los hallados, por primera vez, dos años antes, en una expedición al centro de expansión de las islas Galápagos. La fotografía, tomada desde el *Alvin,* muestra un racimo de gusanos tubícolas que se mecen en corrientes hidrotermales más frías (20 grados C), donde el agua no está ennegrecida por minerales. Los gusanos, clasificados como pogonóforos vestimentiferanos, se caracterizan por sus brillantes penachos rojos que sobresalen de los tubos protectores blancos; algunos de estos gusanos tubícolas alcanzan una longitud de tres metros. Otros organismos presentes son moluscos bivalvos y cangrejos blancos. En la base de la cadena alimentaria hay bacterias quimiosintéticas; la comunidad no depende de la energía solar. Fotografía de W. R. Normark.



LA LAVA ALMOHADILLADA recubre gran parte del fondo oceánico próximo a las fumarolas hidrotermales. La forma almohadillada se debe al rápido enfriamiento del magma emitido a través de grietas de la corteza durante una erupción volcánica. Detrás, puede verse un sismómetro de fondo; desde un buque de superficie se mantuvo una red de este tipo de aparatos. La fotografía fue tomada por John A. Orcutt, del Instituto Oceanográfico Scripps.

por F. J. Vine y D. H. Matthews, de Princeton. Cuando sube magma bajo la dorsal mesoceánica, sus minerales ferromagnéticos quedan magnetizados en la dirección del campo geomagnético. Una vez que el magma se enfría y se solidifica, se conservan la dirección y la polaridad del campo en la roca volcánica magnetizada. Las inversiones del campo dan lugar a una serie de bandas magnéticas paralelas al eje del valle de fractura. Así pues, la corteza oceánica hace las veces de una cinta magnética que registrara la historia del campo geomagnético. Los límites de las bandas están asociados a inversiones del campo magnético que pueden datarse independientemente, gracias a lo cual la anchura de las bandas indica la velocidad de expansión del fondo oceánico. (El mecanismo preciso de inversión del campo magnético terrestre, a intervalos de entre 10.000 y un millón de años, aproximadamente, sigue siendo uno de los grandes misterios de la geología.)

De la teoría de la expansión del fondo oceánico se desprende que muchos de los rasgos geológicos más interesantes de la superficie terrestre se encuentran en aquél. La investigación de tales accidentes ha avanzado en los últimos años merced al desarrollo de sumergibles tripulados de gran profundidad. En particular, el sumergible para investigación *Alvin,* del Instituto Oceanográfico Woods Hole, se ha revelado como un valioso instrumento para estudiar el fondo marino. Desde el *Alvin,* un geólogo puede recoger muestras de rocas y documentar con detalle el contexto de cada roca. Por primera vez, un geólogo marino puede contar con mapas de un lugar tan precisos como los que usa el geólogo continental.

El trabajo inicial llevado a cabo con el *Alvin,* que empezó en 1973, puso de manifiesto que la máxima rentabilidad de los sumergibles se obtenía en las fases finales de una expedición submarina. La permanencia en el fondo es breve (seis horas o menos) y resulta cara. Todo medio de cartografía del fondo del mar, incluido el uso de cámaras de control remoto, sonares de barrido de gran poder de resolución y otros instrumentos de registro, debe explotarse al máximo, de manera que el *Alvin* pueda ser guiado a lugares geológicamente claves. Empleado con estos criterios de ahorro y control, el *Alvin* resulta una herramienta muy productiva para recabar información. Durante los últimos siete años, se ha usado para investigar ciclos de actividad volcánica y patrones de inversión geomagnética a lo largo de la dorsal mesoatlántica y para estudiar cortes de afloramientos de la corteza en el sistema de valles de la fosa de Cayman, cerca de Jamaica. La observación de manantiales hidrotermales y de las exóticas formas de vida asociadas a ellos tuvo lugar, por primera vez, en 1977, en inmersiones efectuadas con el *Alvin* a lo largo del centro de expansión de las islas Galápagos, frente a la costa de Ecuador.

Aquí trataremos sobre los resultados de la última expedición llevada a cabo por el sumergible: la realizada en la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, a unos 3000 kilómetros al noroeste del lugar de inmersión en las Galápagos. Con su ayuda y con instrumentos arrastrados por buques de superficie, medimos propiedades tales como la magnetización y la conductividad eléctrica de las rocas corticales, la velocidad de las ondas sísmicas bajo la dorsal y la magnitud de las anomalías gravitatorias sobre ella. Todas estas propiedades son indicadores sensibles de las características de la cámara magmática axial supuestamente subyacente al valle de fractura. Durante esta expedición descubrimos las fuentes termales submarinas, las más calientes de las halladas hasta el presente en el océano.

Exploraciones preliminares

Para el descenso escogimos un lugar junto al límite norte de la dorsal del Pacífico oriental, frente a la boca del golfo de California. La propia dorsal se prolonga hacia el norte por el eje del golfo y se une con el sistema de fallas de San Andrés, California. Frente al golfo, forma parte del límite entre la placa pacífica y la placa Rivera, fragmento de la placa norteamericana, que es mucho mayor.

La expansión del valle de fractura en la zona estudiada se realiza a una velocidad de unos seis centímetros al año, casi tan rápida como la de crecimiento de las uñas del hombre; triplica la de la dorsal mesoatlántica, pero es sólo un tercio del máximo conocido: 18 centímetros al año, valor observado cerca de la isla de Pascua, situada en otra parte de la dorsal del Pacífico oriental. Se eligió este lugar porque se le consideraba un centro típico de velocidad de expansión mediana y por la abundante y detallada información que de él disponíamos.

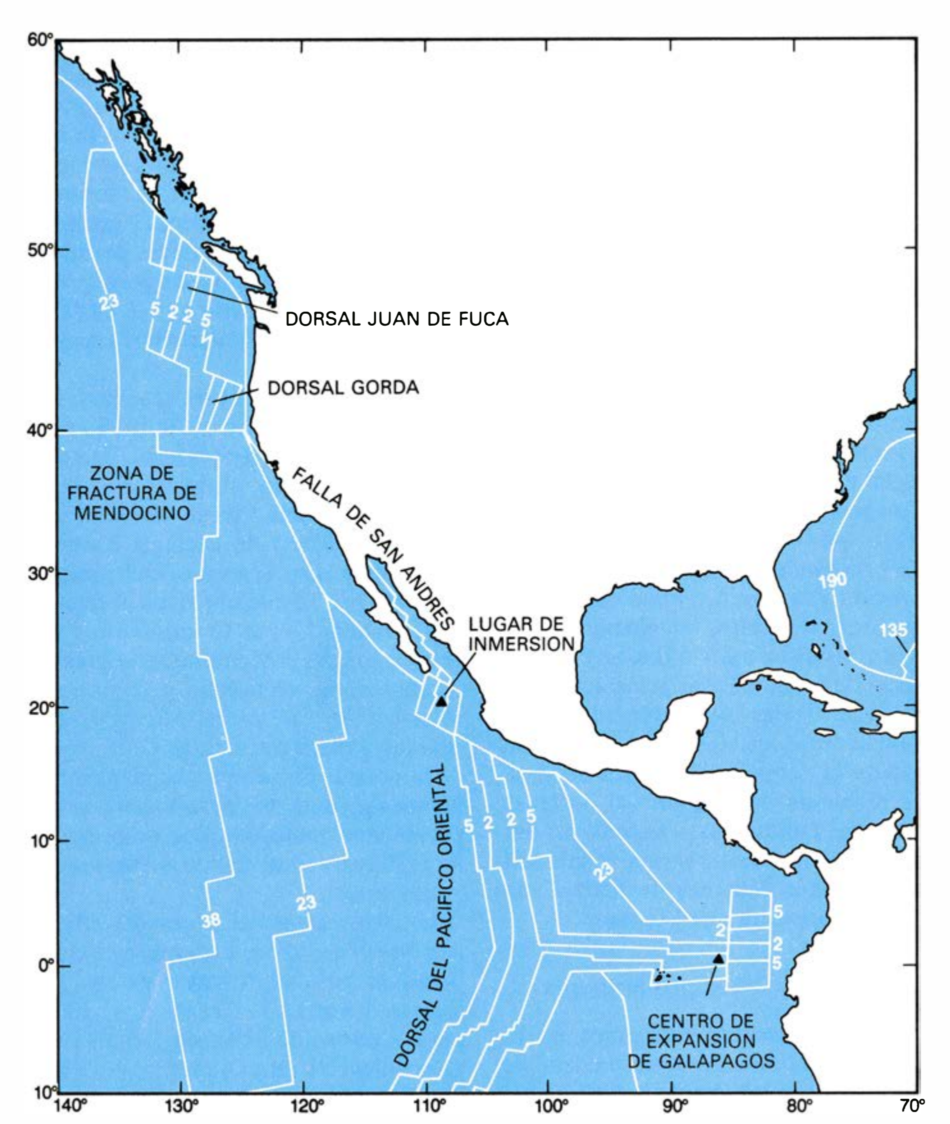
En las expediciones previas habíamos obtenido un cuadro bastante claro del contexto geológico del centro de expansión y de sus dimensiones globales. Con la ayuda de un vehículo no tripulado, el Deep Towed Instrument Package, del Instituto Oceanográfico Scripps, se habían efectuado estudios magnéticos, fotográficos, y de sonar, que indicaron que en este punto la anchura del centro de expansión no rebasaba uno o dos kilómetros. La confrontación de mapas batimétricos y geológicos del centro de expansión permitió identificar zonas adecuadas para la exploración. Se estableció que la profundidad media de las inmersiones superaría los 2600 metros.

La primera fase del programa de inmersión la dirigió, en 1978, un equipo de investigadores de Francia, Estados Unidos y México, dirigido por Jean Francheteau, del Centro de Estudios Oceanográficos y de Biología Marina, de Bretaña. Los descensos del equipo, formado por 12 miembros, en el sumergible francés *Cyana* se dirigieron a investigaciones geológicas que exigían la viabilidad de maniobrar y reconocer, visualmente y de cerca, afloramientos rocosos y otras estructuras de la cresta de la dorsal. Entretanto, se planificaba la fase siguiente de operaciones: los experimentos geofísicos, que empezarían en 1979 con el sumergible *Alvin,* mayor y más estable.

Los tripulantes del *Cyana* descubrieron que el centro de expansión se componía en realidad de cuatro zonas geológicas. La zona 1, directamente en el eje del centro de expansión, es una región volcánica muy moderna, cuya anchura ronda el kilómetro. Casi todo el material volcánico nuevo producido en el centro de expansión parece haber emanado sobre el fondo del mar a través de esta banda, de estrechez tan notoria. Las coladas basálticas halladas aquí, la mayoría en forma de la típica "lava almohadillada" de las erupciones subacuáticas, están prácticamente desnudas, sin sedimentos que las recubran. Su brillo es vítreo y fresco; apenas presentan alteración por interacciones con el agua marina.

En contacto inmediato con la zona neovolcánica, la corteza de formación reciente empieza a acelerarse horizontalmente, alcanzando una velocidad máxima de expansión de tres centímetros por año a cada lado del eje. En esta región, designada zona 2, la corteza ha sufrido extensión y agrietamiento de tracción. Las grietas menores tienden a alinearse paralelas a la dirección general nordeste-sudoeste de la dorsal y, perpendiculares, a la dirección de expansión. La zona fisurada de cada lado del eje central mide entre medio kilómetro y dos kilómetros de anchura.

Probablemente, la corteza situada hacia fuera de la zona 2 aún experimen-



DORSAL DEL PACIFICO ORIENTAL, límite entre la placa pacífica y la placa Rivera (fragmento de la placa norteamericana) en la región situada frente a la costa occidental de México, seleccionada para su exploración. Los triángulos indican las estaciones de inmersión del proyecto de la dorsal del Pacífico oriental y de una expedición anterior al centro de expansión de las Galápagos, frente a Ecuador. A ambos lados, la corteza oceánica crece a una velocidad aproximada de seis centímetros por año. Las isocronas numeradas señalan la edad de la corteza oceánica en millones de años. El mapa se basa en el preparado por W. Pitman, R. Larson y E. Herron y en uno publicado por la Sociedad Geológica de América.

te cierta aceleración, si bien en la región siguiente, designada zona 3, empiezan a desarrollarse fallas "normales" importantes. Las fallas, casi verticales, parecen una inmensa escalinata. Se producen por súbitos movimientos verticales en las rocas cuando el esfuerzo principal es de tensión. El deslizamiento a lo largo de las fallas provoca terremotos frecuentes, cuya magnitud máxima viene a ser de 5,5 en la escala de Richter. Los escarpes, es decir, los planos de falla que afloran, suelen estar encarados hacia el centro de expansión; alcanzan alturas de hasta 70 metros. A unos 10 kilómetros del centro de expansión, en la región designada zona 4, la fracturación activa disminuye bruscamente y disminuye también, a buen seguro, la aceleración horizontal de la corteza.

Las inmersiones del *Cyana,* en 1978, revelaron la presencia de formaciones de lava y depósitos minerales excepcionales. Se observaron lagos de lava solidificada, probablemente formados por emisiones rápidas de lava, algunos de los cuales miden varios hectómetros de longitud y más de cinco metros de profundidad. En determinados puntos, la superficie de un lago de lava se ha hundido, abriendo un hoyo. En las márgenes de los lagos, pilares y muros de basalto están señalados con bandas de vidrio basáltico de enfriamiento rápido que quizá constituyen un registro de cambios rápidos en el nivel de la lava. Probablemente, las bandas se formaron durante el vaciamiento lateral de los lagos o durante el drenaje de vuelta de la lava a la cámara magmática subyacente.

Cerca del límite entre las zonas 1 y 2 se descubrió una cadena de montículos de varios metros de altura. Los geoquímicos del grupo dirigido por Roger Hekinian comprobaron que tales promontorios constaban de sulfuros de cinc, hierro y cobre, con una pequeña mezcla de plata. Se sospechó que los montículos de sulfuros se debían a la surgencia hidrotermal de fluidos a través del fondo oceánico. Otros tres indicios revelaban que la actividad hidrotermal podía ser importante en la región. Ya en 1974, y de nuevo en 1977, se detectaron anomalías térmicas de varias centésimas de grados centígrados y se midieron concentraciones excepcionalmente elevadas de helio 3 sobre el centro de expansión. El isótopo ligero del helio suele considerarse un indicador fidedigno de actividad hidrotermal. Además, en una de las inmersiones del *Cyana* los tripulantes observaron conchas grandes de moluscos bivalvos parecidas a las vistas en las fumarolas hidrotermales de las Galápagos, si bien ninguna de las conchas de la estación más septentrional contenía bivalvos vivos. (El punto de inmersión del *Cyana* en aquel descenso se hallaba a pocos hectómetros de las fumarolas descubiertas un año después por el *Alvin.*)

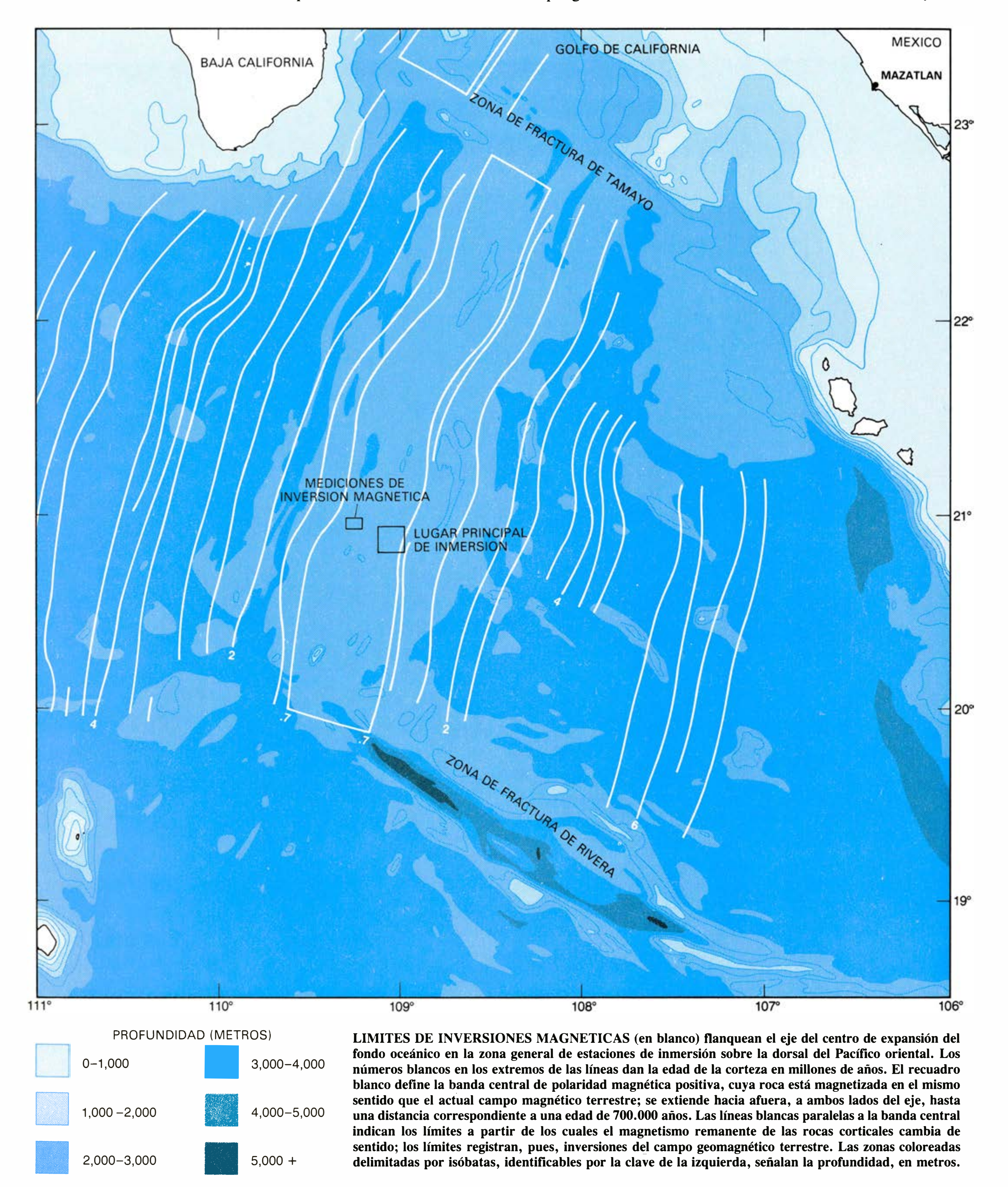
El campo hidrotermal

En 1979, poco después de la entrada en escena del *Alvin,* efectuamos una breve exploración fotográfica y cartográfica del eje del centro de expansión, al sudoeste del lugar observado desde el *Cyana*. Queríamos investigar los cambios en las estructuras geológicas a lo largo del centro de expansión y seguir los tentadores indicios de actividad hidrotermal. Fue un tiempo bien aprovechado. Bajo la dirección de Fred N. Spiess, del Instituto Scripps, se envió el Deep-Towed Instrument Package a tomar perfiles topográficos y de barrido lateral de sonar, ampliando nuestro mapa batimétrico hacia el sudoeste y delimitando el eje del centro de expansión.

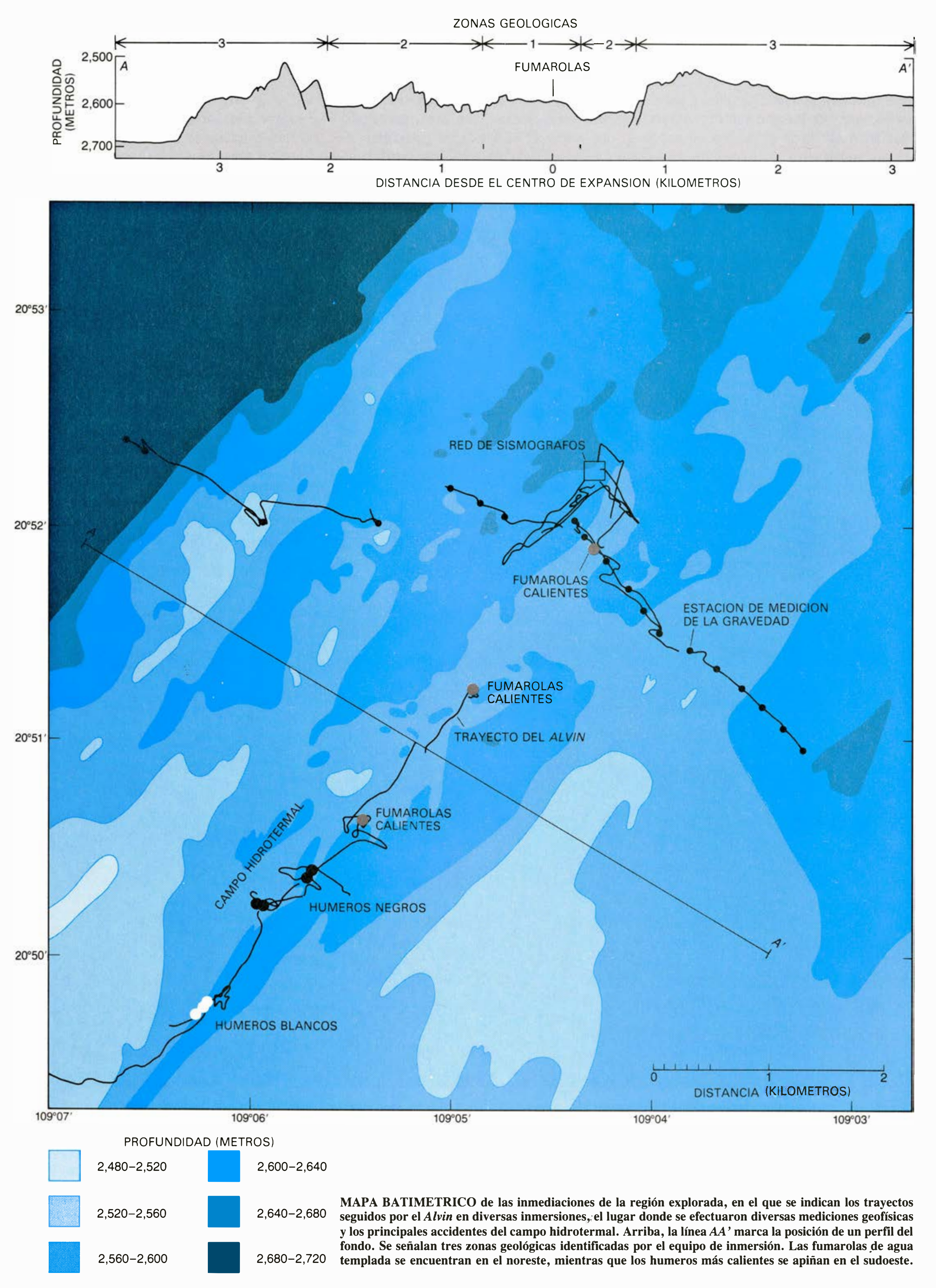
Se sumergió la *Angus,* una cámara portátil sólidamente construida y dotada, además, de un sensor térmico, hasta el fondo oceánico en una serie de trayectos longitudinales, escasos metros por encima del escabroso terreno volcánico. Guiada por Robert D. Ballard, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, la *Angus* detectó temperaturas elevadas en diversos puntos y midió y teletransmitió la información al buque de control, en la superficie. Subimos la cámara inmediatamente y

aguardamos expectantes el revelado de la película. Enseguida examinamos el rollo de película revelada hasta encontrar una docena de vistas que mostraban un conjunto de animales y plantas del fondo similares a los descubiertos dos años antes en el centro de expansión de las Galápagos. Al parecer, las fuentes hidrotermales de las Galápagos y las comunidades biológicas asociadas a ellas no eran únicas.

La prueba resultó lo bastante sorprendente como para hacernos trasladar hacia el sudoeste el programa de inmersión previsto. Se reforzó el equipo de inmersores con otros doce geólogos y geofísicos estadounidenses, franceses y mexicanos, incluidos nosotros dos. Primero, se colocó en la zona 1, con gran precisión, una serie triangular de sismómetros de fondo, con la ayuda



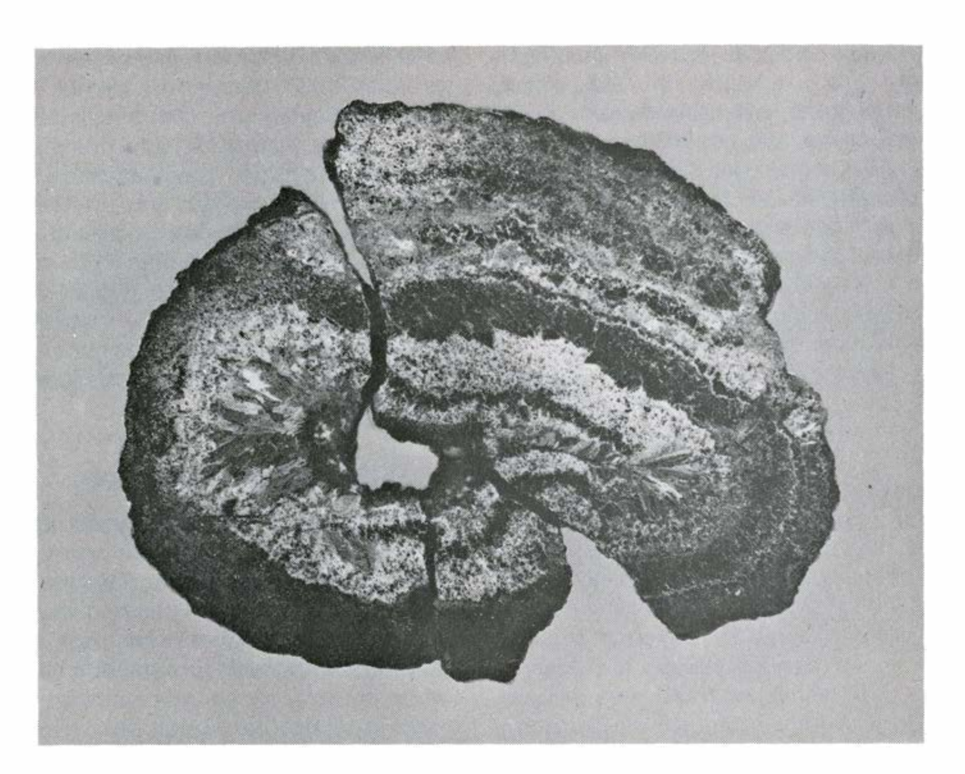
LIMITES DE INVERSIONES MAGNETICAS (en blanco) flanquean el eje del centro de expansión del fondo oceánico en la zona general de estaciones de inmersión sobre la dorsal del Pacífico oriental. Los números blancos en los extremos de las líneas dan la edad de la corteza en millones de años. El recuadro blanco define la banda central de polaridad magnética positiva, cuya roca está magnetizada en el mismo sentido que el actual campo magnético terrestre; se extiende hacia afuera, a ambos lados del eje, hasta una distancia correspondiente a una edad de 700.000 años. Las líneas blancas paralelas a la banda central indican los límites a partir de los cuales el magnetismo remanente de las rocas corticales cambia de sentido; los límites registran, pues, inversiones del campo geomagnético terrestre. Las zonas coloreadas delimitadas por isóbatas, identificables por la clave de la izquierda, señalan la profundidad, en metros.



MAPA BATIMETRICO de las inmediaciones de la región explorada, en el que se indican los trayectos seguidos por el *Alvin* en diversas inmersiones, el lugar donde se efectuaron diversas mediciones geofísicas y los principales accidentes del campo hidrotermal. Arriba, la línea *AA'* marca la posición de un perfil del fondo. Se señalan tres zonas geológicas identificadas por el equipo de inmersión. Las fumarolas de agua templada se encuentran en el noreste, mientras que los humeros más calientes se apiñan en el sudoeste.

de señales enviadas por reflectores acústicos al fondo oceánico. Varias inmersiones preliminares con el *Alvin* demostraron que se podían lograr mediciones sísmicas y gravitatorias. En la tercera inmersión, Francheteau y uno de nosotros (Luyendyk) vieron las chimeneas hidrotermales.

No es fácil comunicar la extraña peculiaridad de esta experiencia. Para empezar, hay que pasar dos horas en cerrada oscuridad, mientras se baja por gravedad más de dos kilómetros y medio hasta llegar al fondo oceánico. Tres personas están acurrucadas entre los límites fríos e incómodos del compartimento esférico presurizado, de sólo dos metros de diámetro, del *Alvin*. Al llegar cerca del fondo se encienden los faros de cruce del sumergible, y el agua iluminada adquiere un brillo verdoso oscuro. Minutos después se contempla ya el fondo marino. En cuanto el *Alvin* llega al fondo, el equipo transmite su posición al buque de control, de donde recibe las órdenes para conducirlo hasta un lugar determinado del fondo. Avanzando lentamente (a medio kilómetro por hora) sobre la roca volcánica resplandeciente, los investigadores miran a través de las portillas un campo iluminado de sólo 10 o 15 metros enmarcado en la oscuridad.



CORTE TRANSVERSAL DE UNA pequeña chimenea, representativa de las halladas en el campo hidrotermal. Las bandas concéntricas de minerales contienen principalmente blenda, pirita y calcopirita, que son sulfuros de cinc, hierro y cobre y hierro, respectivamente. Las transiciones de un mineral a otro reflejan cambios en las propiedades de los fluidos emitidos. La fotografía fue tomada por Rachel Haymon, del Instituto Scripps, que fue también quien analizó el contenido mineral de la chimenea.

Un nuevo ecosistema

En aquella inmersión, estábamos efectuando mediciones gravitatorias en la zona volcánica cuando nos vimos sobre el campo hidrotermal. La escena parecía sacada de una vieja película de terror. A lo largo del eje de la zona neovolcánica manaba agua reluciente entre las lavas basálticas almohadilladas. Entre las almohadillas negras anidaban grandes bivalvos blancos, de hasta 30 centímetros de longitud, y unos cangrejos blancos huían cegados a través del terreno volcánico. Lo más espectacular de todo fueron los rosarios de gigantescos gusanos tubícolas, algunos de hasta tres metros de longitud. Estos animales misteriosos parecían vivir en apretadas colonias alrededor de las fumarolas, en aguas de entre 2 y 20 grados centígrados de temperatura. Los gusanos, conocidos por pogonóforos vestimentiferanos, se mecían extrañamente en las corrientes hidrotermales, con sus penachos rojos brillantes, prolongados mucho más allá de sus blancos tubos protectores. (El color rojo de los penachos de los gusanos y de los tejidos de los bivalvos se debe a la presencia de hemoglobina oxigenada en su sangre.) Ocasionalmente, un cangrejo subiría por el tubo de un gusano tubícola, seguramente para atacar su penacho.

En inmersión posterior, se encaminó el *Alvin* a otra región hidrotermal identificada por la *Angus*, al sudoeste de las primeras fumarolas que visitamos. La vista resultó todavía más espectacular: fluidos extremadamente calientes, ennegrecidos por precipitados de sulfuros, eran arrojados hacia arriba a través de orificios con aspecto de chimenea de hasta 10 metros de altura por 40 centímetros de anchura. Los bautizamos "humeros negros". Las chimeneas sobresalían apiñadas en los montículos de precipitados de sulfuros. Una estructura enigmática que se había avistado el año anterior desde el *Cyana* era, probablemente, un humero negro de este tipo, fosilizado.

Nuestros intentos iniciales de medir la temperatura de los fluidos negros fracasaron. Hasta entonces, la temperatura más alta registrada sobre el fondo oceánico era de 21 grados C, medida sólo dos meses antes sobre el centro de expansión de las Galápagos. Teníamos calibrado el termómetro para medir hasta 32 grados C; al ser introducido en la primera chimenea, la lectura rebasó inmediatamente la escala. Además, una vez recuperado el medidor, la varilla plástica en la que estaba montado ¡mostró signos de fusión! A toda prisa, se recalibró in situ la sonda térmica y se hicieron mediciones en otras inmersiones; éstas indicaron temperaturas de por lo menos 350 grados C, suposición que luego precisó mejor otro equipo de inmersión provisto de un termómetro modificado para incluir tal amplitud de temperatura. El agua a 350 grados no hierve, porque a la profundidad a la que se hallan las chimeneas la presión es unas 275 veces la atmosférica.

Los manantiales hidrotermales presentes a lo largo de la cresta de la dorsal varían mucho. Hacia el nordeste, las aguas emanadas son relativamente transparentes; también están más frías (por debajo de los 20 grados C) y se difunden lentamente a través de las rocas. En ellas se encuentran las comunidades biológicas más densas. Hacia el sudoeste, las fumarolas emiten fluidos más calientes cargados de precipitados minerales. El ritmo de emisión también aumenta hacia el sudoeste y culmina en los espectaculares humeros negros. Este gradualismo regular sugiere la posibilidad de ciclos en la intensidad de la actividad volcánica e hidrotermal a lo largo del eje.

La comunidad biológica encontrada resultó ser muy parecida a la hallada en 1977 sobre el centro de expansión de las Galápagos. Faltaban determinados mejillones pardos característicos de la zona de las Galápagos, pero las anémonas de mar, los gusanos serpúlidos, los cangrejos de los grupos galateidos y braquiúridos, los grandes bivalvos y los

gusanos tubícolas gigantes parecían todos iguales a los de allí. Cada colonia ocupaba una extensión de unos 30 metros de anchura por 100 metros de longitud. Lo que atrae a los animales no es la calidez de los fluidos hidrotermales, sino la acumulación de fuentes alimenticias, puesto que, junto a las fumarolas, los nutrientes se presentan en concentraciones centenares de veces mayores que en las aguas circundantes.

Robert R. Hessler, del Instituto Scripps, J. Frederick Grassle, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, y otros investigadores han analizado la cadena alimentaria de este sistema ecológico tan extraordinario. En la base de la cadena trófica hay bacterias quimiosintéticas que oxidan ácido sulfhídrico emitido por las fumarolas y forman azufre elemental y diversos sulfatos. Las bacterias aprovechan la energía liberada por la oxidación para incorporar anhídrido carbónico en la materia orgánica. La mayoría de los organismos mayores se alimentan de bacterias por filtración o bien viven en simbiosis con ellas. Algunos son carroñeros o depredadores. Las comunidades no dependen en absoluto de la fotosíntesis ni de la energía solar, sino que se fundan en el flujo energético procedente del interior de la tierra. El hecho de que este tipo de comunidades se haya encontrado tanto en el centro expansivo de las Galápagos como en la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, puntos distantes unos 3000 kilómetros, induce a creer que pueden estar distribuidas a lo largo de gran parte del sistema mundial de valles de fractura. Las comunidades deben de llevar una vida precaria, por cuanto los sistemas de fumarolas hidrotermales emiten o no en función de ciclos volcánicos esporádicos. Realmente, los montones aislados de conchas vacías de moluscos bivalvos de tamaño uniforme dan fe de mortandades locales en masa.

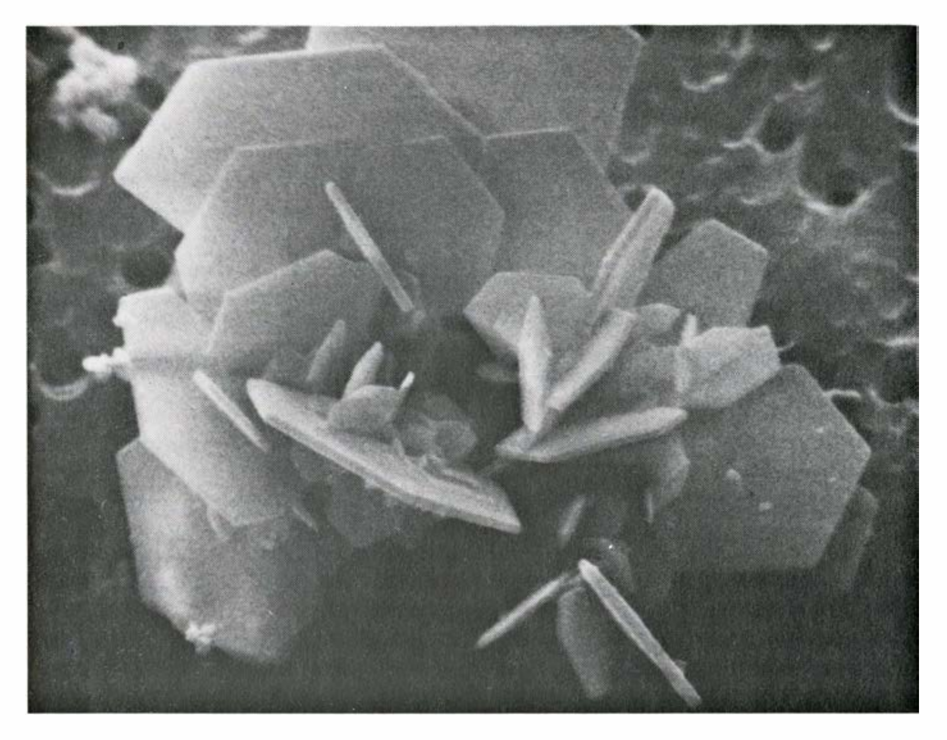
Implicaciones geoquímicas

El descubrimiento de fumarolas hidrotermales en los ejes de dos centros de expansión del Pacífico ha revolucionado las teorías sobre el balance químico de los océanos. Antes se creía que el agua marina mantenía un equilibrio entre los procesos de entrada (principalmente la aportación de los ríos) y los procesos de salida (la deposición de sedimentos y las reacciones químicas a baja temperatura entre el agua de mar y el fondo oceánico). Pero, conforme iba aumentando el conocimiento relativo a la abundancia de minerales y a las reacciones a baja temperatura entre el agua marina y las rocas sedimentarias y volcánicas, fueron surgiendo problemas con la "contabilidad" de ciertos elementos. Por ejemplo, los ríos aportan más iones magnésicos y de sulfatos de los que restan al mar la sedimentación, la formación de arcillas y la meteorización del basalto. Por otra parte, al parecer, el fondo oceánico acumula mucho más manganeso del que los ríos pueden suministrar.

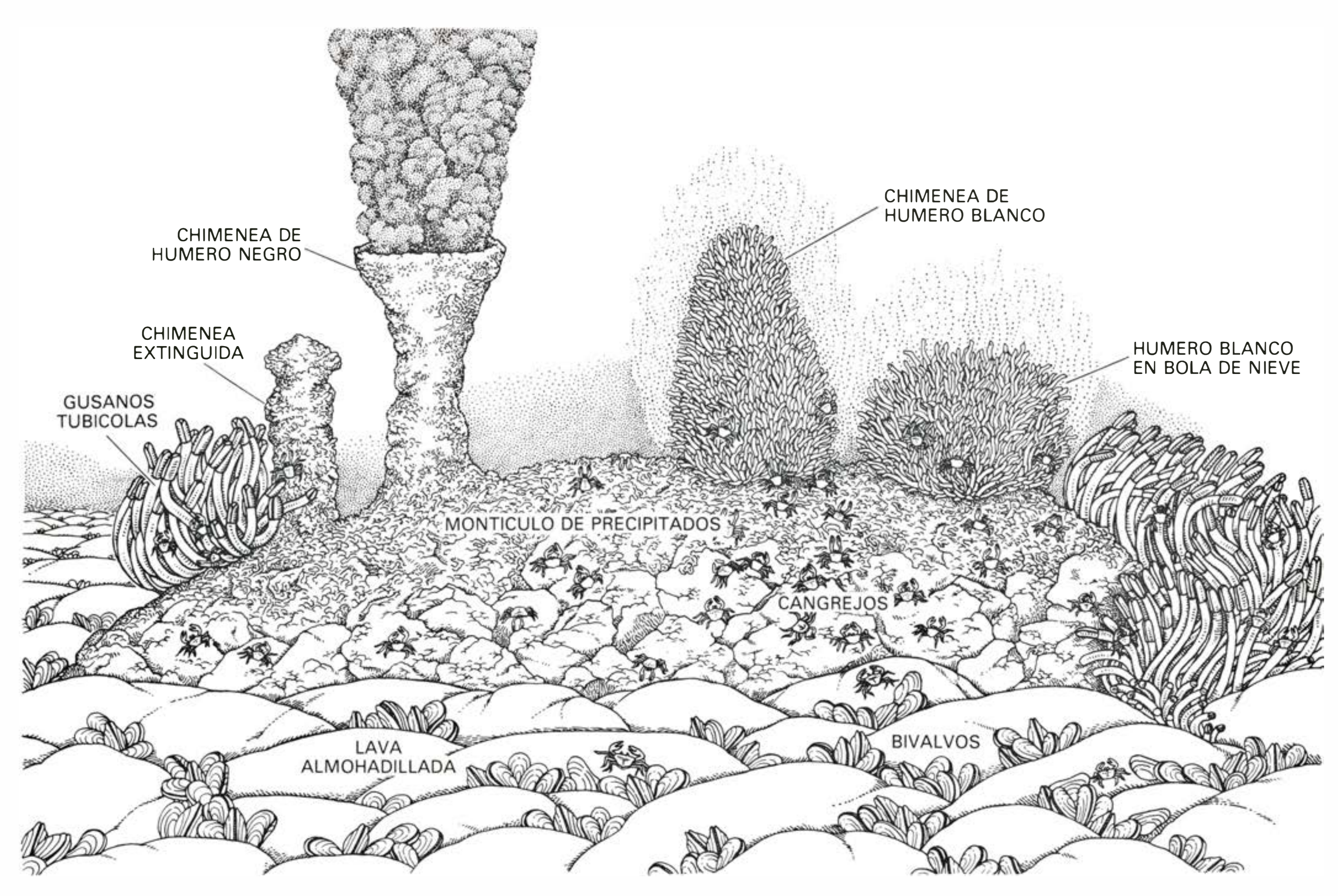
La circulación hidrotermal de agua de mar a lo largo de sistemas submarinos de valles de fractura introduce un nuevo factor: los intercambios químicos a alta temperatura entre fluidos y sólidos. Según John M. Edmond, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, las reacciones entre agua marina y roca basáltica pueden convertir sulfatos disueltos en minerales sólidos, sulfatos y sulfuros; reacciones parecidas pueden eliminar iones magnesio e hidroxilos (OH^-) del agua de mar y almacenarlos en arcillas hidrotermales. Estas reacciones convierten el agua marina caliente en una solución ácida y químicamente reducida que lixivia, de las rocas, calcio, silicio, manganeso, hierro, litio y otros iones de carga positiva y los libera en el océano. De este modo, los sistemas hidrotermales pueden equilibrar el contenido de los constituyentes minerales principales del agua de mar; la circulación hidrotermal permite explicar también la concentración y distribución observadas de muchos constituyentes secundarios y traza.

Edmond ha descubierto que las emisiones hidrotermales del sistema de las Galápagos se mezclan con agua marina normal en su ascenso por la roca volcánica. La mezcla disminuye la temperatura de los fluidos y provoca la deposición de minerales en las rocas, lo que altera la química de las aguas termales que descargan sobre el fondo oceánico. La elevada temperatura y la composición química de las emanaciones en la estación de la dorsal del Pacífico oriental estudiada indican que aquí los fluidos hidrotermales no se mezclan significativamente con agua marina fría en su salida al fondo oceánico. Por tanto, los fluidos representan la contribución hidrotermal real al ciclo químico marino. El agua que sale de las fumarolas ha bajado un gran trecho hacia la cámara magmática antes de regresar al fondo marino.

Al parecer, los fluidos hidrotermales no diluidos de la estación de la dorsal del Pacífico oriental se ennegrecen con precipitados de grano fino de sulfuro de hierro y sulfuro de cinc, al entrar en contacto con agua marina fría y alcalina en el fondo oceánico. Los análisis preliminares de Rachel Haymon y Miriam Kastner, del Instituto Scripps, revelan



PRECIPITADO FILTRADO de la emanación de un humero negro, visto al microscopio electrónico de barrido. Las laminillas hexagonales son cristales de pirrotina, una de las formas del sulfuro de hierro. Entre los minerales que se recogieron del agua que manaba del humero negro había, además, pirita, blenda y otros sulfuros. La microfotografía es, aquí, de J. Douglas Macdougall, del Instituto Scripps.



PAISAJE IDEALIZADO del campo hidrotermal próximo a los humeros de alta temperatura; muestra una serie de estructuras fumarólicas típicas sobre un montículo de minerales precipitados y restos orgánicos. La chimenea de humo blanco se yergue junto a madrigueras construidas por un organismo apenas estudiado, llamado gusano de Pompeya. Los fluidos blancos nebulosos emitidos por el humero blanco están a más de 300 grados C. El agua más caliente, a más de 350 grados C, procede de los humeros negros, cuyas chimeneas están formadas por precipitados de sulfuros. El montículo se alza sobre un terreno dominado por lava almohadillada, negra y brillante; en las grietas de las almohadillas habitan bivalvos. Ilustración de P. Y. Wynne.

que los montículos y las chimeneas que circundan las fumarolas están compuestos, en su mayor parte, por sulfuros de cinc, hierro y cobre y por sulfatos de calcio y magnesio. Los mecanismos precisos mediante los cuales se forman los minerales, la velocidad de deposición y la razón agua-roca en varios puntos del sistema son hoy temas de debate entre los geoquímicos. Con todo, no cabe duda de que las fumarolas desempeñarán un papel central en los modelos de la química de los océanos.

Experimentos geofísicos

Nuestro programa geofísico pretendía, sobre todo, llegar a conocer mejor la relación entre la supuesta cámara magmática axial y la actividad tectónica, volcánica e hidrotermal del fondo oceánico. Fue una suerte que pudiéramos experimentar en una región donde la actividad hidrotermal era tan rápida. Para averiguar en qué consistía la estructura subsuperficial se efectuaron mediciones de velocidad y actividad sísmicas, anomalías gravitatorias, conductividad eléctrica y polaridad magnética sobre la cresta de la dorsal.

Tanto para los geofísicos como para los geoquímicos y los biólogos, el descubrimiento más impresionante de la expedición fue el relativo a las fumarolas hidrotermales activas. Esta circulación hidrotermal sobre las dorsales mesoceánicas había sido propuesta, a nivel teórico, quince años antes, pero entonces resultó difícil someterla a estudio.

Se puede calcular el ritmo teórico al que la litosfera acabada de formar se enfría por conducción de calor. A su vez, el cálculo especifica el ritmo esperado de flujo de calor conductivo a través de las dorsales mesoceánicas. Pero las mediciones de flujo de calor meramente conductivo, cerca de la cresta de la dorsal, dan valores cuya magnitud es casi un orden menor que la de los modelos teóricos. ¿Acaso los modelos son erróneos? ¿O es que la circulación de agua marina, casi helada, por la corteza caliente acabada de formar la enfría por transferencia de calor convectivo a una velocidad mucho mayor? ¿A qué profundidad penetra el agua marina en la corteza oceánica y qué anchura tiene la zona de descarga? ¿En qué medida se ve afectada la composición química de la corteza por la circulación y qué minerales se depositan? Un dato geofísico clave para responder a tales cuestiones es la profundidad de las grietas y las fisuras de las rocas en el centro de expansión. La profundidad puede determinarse con mediciones de velocidad sísmica, conductividad eléctrica y anomalías gravitatorias.

La gran discrepancia entre el valor medido de flujo de calor conductivo a través del fondo oceánico y el valor que predicen los modelos de litosfera que se enfría induce a creer que por lo menos un tercio del calor perdido en las dorsales mesoceánicas se transmite por medios no conductivos, seguramente por circulación hidrotermal. En el centro de expansión de las Galápagos, donde por primera vez se observó actividad hidrotermal, los cálculos de flujo de calor se veían obstaculizados por la naturaleza difusa de la circulación. Las condiciones en la estación de la dorsal del Pacífico oriental resultaban más favora-

bles a la hora de efectuar tales mediciones.

Mediante una observación minuciosa de las películas y de los videotapes de las fumarolas, se calcularon velocidades de flujo. Dada una velocidad media de emisión de dos o tres metros por segundo, una sola fumarola proporciona un flujo de calor de unos 60 millones de calorías por segundo. Ello viene a ser de tres a seis veces la pérdida teórica total de calor a través de un segmento de un kilómetro de longitud de dorsal mesoatlántica hasta una distancia de 30 kilómetros a cada lado. En la parte sudoccidental de la región estudiada se hallaron por lo menos 12 chimeneas grandes; el flujo total de calor era, evidentemente, muy grande. En realidad, la magnitud de la pérdida de calor sugiere que la vida media de una fumarola probablemente sea corta, quizá de unos cuantos años.

Las fumarolas parecen estar confinadas en una región lineal angosta de unos hectómetros de anchura y seis kilómetros de longitud, dentro de la zona neovolcánica. En esta banda se detectaron y se verificaron fotográficamente 12 anomalías térmicas, y se visitaron y se estudiaron con el *Alvin* un total de ocho fumarolas. En líneas generales, las más frías, situadas hacia el nordeste, están rodeadas de comunidades biológicas estilo Galápagos. Las más calientes, próximas al extremo sudoccidental, también presentan formas de vida raras asociadas a ellas, pero los animales tienden a habitar a una distancia segura (varios metros) de las fumarolas.

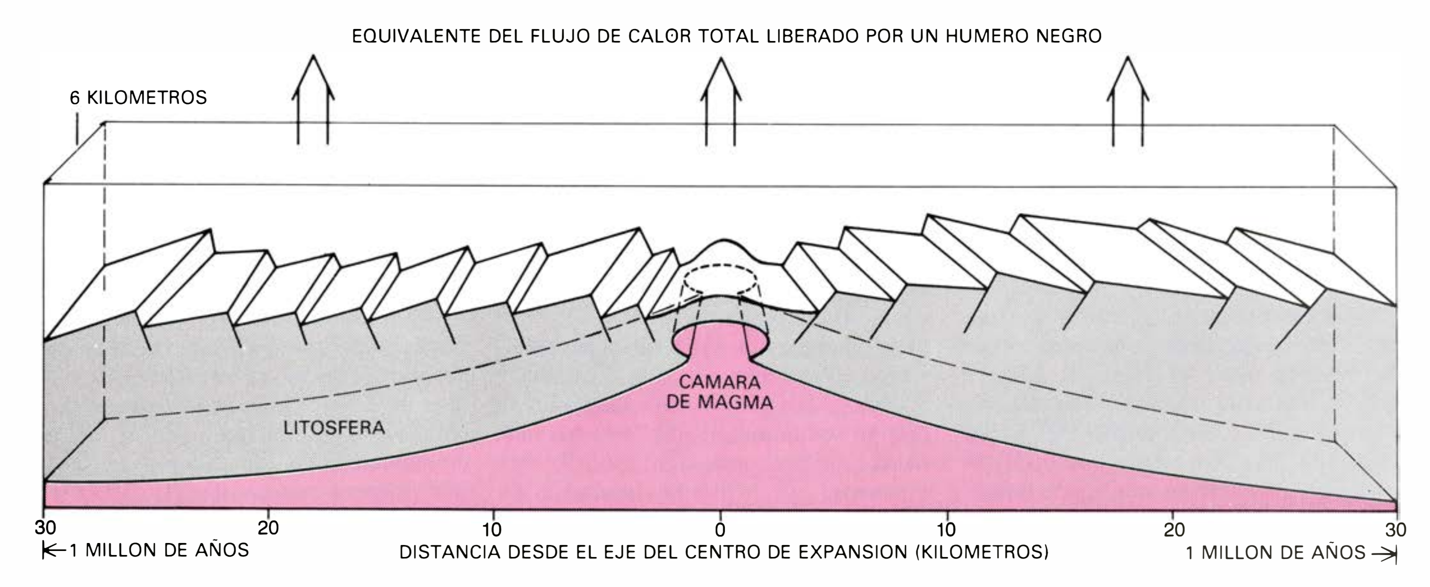
John A. Orcutt y uno de nosotros (Macdonald) idearon un experimento sísmico de gran poder de resolución para determinar la profundidad de agrietamiento y fisuración de las rocas a lo largo de la cresta de la dorsal. Nos propusimos medir la velocidad de las ondas sísmicas en la corteza superior en función de la profundidad. La transmisión esférica de energía desde una carga explosiva detonada en la superficie del mar provoca reverberaciones de los accidentes topográficos cercanos; por eso, pierde finura la resolución de las mediciones sísmicas en los 1000 metros superiores de la corteza. Para superar esta dificultad, hubo que idear un método de emplazar tanto los emisores como los receptores de ondas sísmicas sobre el fondo del mar. Si el experimento tenía que funcionar, debíamos cronometrar también los acontecimientos a escala de milésimas de segundo.

Mediciones sísmicas

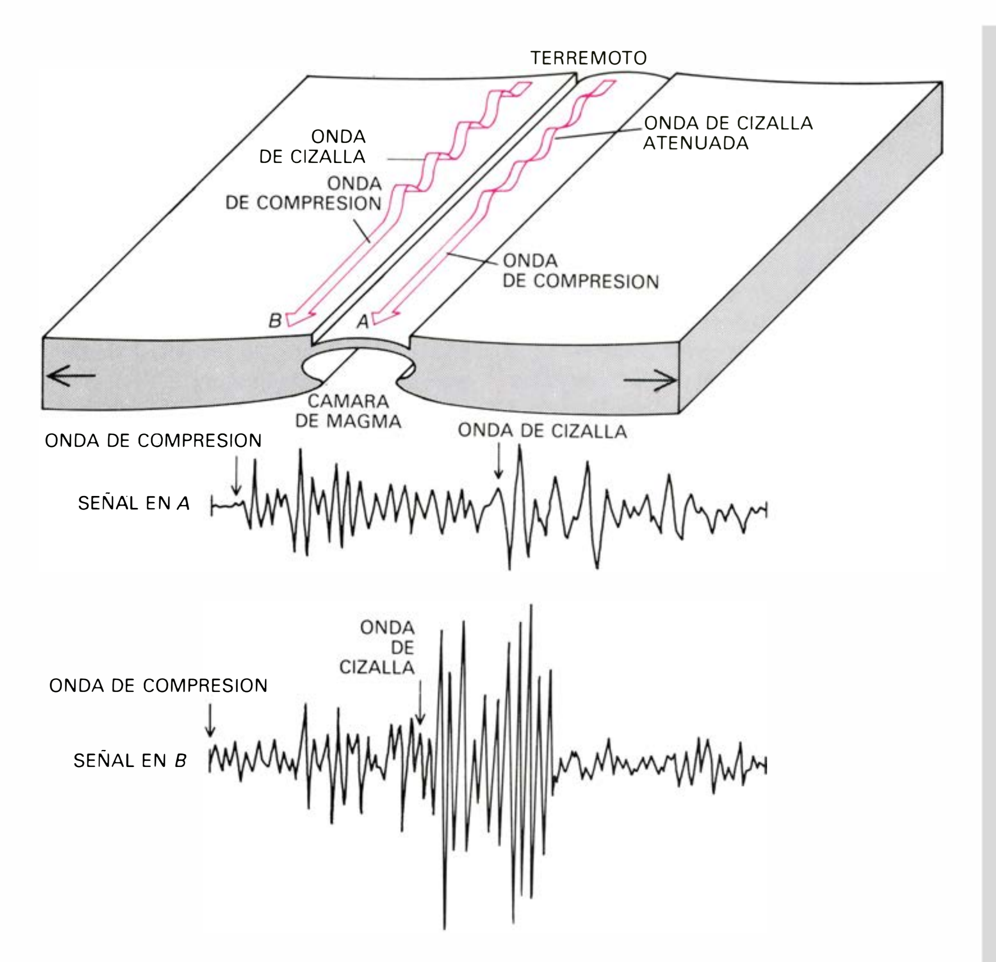
El *Alvin* permitió resolver ambos problemas. A la elevada presión reinante a gran profundidad, las cargas explosivas no sirven ya prácticamente de fuentes sísmicas, razón por la cual adjuntamos al *Alvin* un martillo hidráulico que cumpliera ese cometido. A fin de establecer una base cronológica precisa, se subió el *Alvin* dos metros por encima de cada uno de los sismómetros instalados en el fondo, para calibrar el "ruido" del martillo en el fondo; la respuesta la registraron un sensor, situado a bordo del *Alvin*, y el sismómetro. Al final de la inmersión, el sumergible regresaba para recalibrar cada sismómetro.

Cuatro inmersiones bastaron para confeccionar un perfil de refracción sísmica de 1000 metros de longitud, paralelo al centro de expansión, y un perfil transversal a él de 800 metros de longitud. Aunque no ha finalizado el análisis de los datos, los cálculos relativos al tiempo de recorrido proporcionan ya una determinación provisional de la velocidad de las ondas sísmicas en la superficie de la corteza, paralelamente al eje del centro de expansión. Obtuvimos una velocidad sísmica de 3,3 kilómetros por segundo, muy lenta en comparación con el valor que da el basalto en el laboratorio a la misma presión (aproximadamente 5,5 kilómetros por segundo). La causa de tan baja velocidad estribaba en la fragmentación penetrativa y la porosidad de la roca. No se atravesaron fallas o fisuras grandes, si bien se observaron numerosas grietas muy finas y oquedades en la lava almohadillada. Para llegar a conclusiones más pormenorizadas, concernientes al grado de fragmentación y porosidad necesarias, que expliquen lo observado, habrá que contar con mediciones de las propiedades físicas de las muestras de rocas y con análisis sísmicos en tramos más largos, todavía por realizar. De especial interés será conocer a qué profundidad la velocidad sísmica supera los cinco kilómetros por segundo, indicando así que están cerradas la mayoría de las fisuras.

Los resultados de un experimento anterior de refracción sísmica habían señalado la presencia de una cámara magmática a dos o tres kilómetros de profundidad, bajo el campo hidrotermal. En ese experimento, menos preciso pero de escala mayor, se explosiona-



EL CALOR EMITIDO POR LAS FUMAROLAS hidrotermales contribuye significativamente al calor total de la tierra. Aquí se compara la aportación de un solo humero negro con el calor transmitido, por conducción, a través de la corteza. La contribución de la fumarola equivale al flujo conductivo de un segmento del sistema de valles de fractura cuyas dimensiones fueran de unos seis kilómetros en dirección paralela al eje y otros 60 perpendiculares a él.



ONDAS SISMICAS de cizalla o transversales. Se trata de vibraciones de oscilación perpendicular a la dirección de propagación. Las ondas sísmicas se atenúan al atravesar la cámara magmática supuestamente subyacente al eje del centro de expansión. Cuando un sismómetro de fondo instalado sobre el eje (*punto A*) registra la señal sísmica procedente de un terremoto lejano, las ondas de compresión o longitudinales llegan con fuerza; las de cizalla, en cambio, llegan con una amplitud muy reducida. A lo largo de un trayecto paralelo al eje, a sólo 10 kilómetros de distancia (*punto B*), se transmiten eficazmente tanto las de compresión como las de cizalla, lo que sugiere que bajo el eje existe una estrecha cámara de magma.

ron cargas desde un buque de superficie a más de 60 kilómetros de distancia de un conjunto triangular de sismómetros de fondo. Se detectó que, a una profundidad de sólo dos kilómetros bajo el fondo oceánico, había una zona por la que las ondas sísmicas de compresión (longitudinales) se transmitían a baja velocidad, lo que revelaba la presencia de roca parcialmente fundida. A 10 kilómetros del eje del centro de expansión, la velocidad sísmica resultó ser la normal del basalto oceánico o algo superior a la normal. De lo que cabe deducir que la cámara magmática parece confinada a una zona de 20 kilómetros de anchura, centrada en el eje de la zona de expansión.

Terremotos y vulcanismo

La existencia de una cámara axial de magma la corroboran también las mediciones de propagación de las ondas sísmicas de cizalla (transversales) originadas por terremotos. Las ondas de cizalla se amortiguan mucho en rocas parcialmente fundidas, como las de una cámara magmática. Orcutt y dos de sus colaboradores, Ian Reid y William A. Prothero, Jr., descubrieron que, en trayectos a lo largo del centro de expansión, las ondas de cizalla originadas por terremotos se atenúan mucho, mientras que a sólo 10 kilómetros del eje se transmiten eficazmente. Así pues, también ésta constituye una prueba clara (aunque indirecta) de la presencia de una cámara magmática, estrecha y somera, bajo el centro de expansión.

James W. Hawkins, del Instituto Scripps, ha analizado muestras de basalto recogidas por el *Alvin.* La naturaleza de las rocas sugiere también la presencia de una cámara magmática somera axial. Se vio que las muestras de basalto recogidas a lo largo de un corte de seis kilómetros en la zona neovolcánica presentaban una gama reducida de composiciones, lo que reflejaba su procedencia de un único magma madre y

su formación por cristalización fraccionada de los minerales olivino y plagioclasa a una presión relativamente baja. Los resultados se ajustan a los que daría una cámara magmática de menos de seis kilómetros de profundidad, lo cual implica, a su vez, que el techo de la cámara sólo mide unos kilómetros de grosor. Esta delgada capa cobertora se halla profusamente agrietada y fisurada y permite la filtración de agua marina, corteza abajo, hasta profundidades suficientes como para calentarla a 350 grados, por lo menos.

¿Hasta qué profundidad llega la circulación? El verano pasado volvimos a medir microsismos en el campo hidrotermal, prosiguiendo así las mediciones sísmicas del fondo oceánico. Con la ayuda de los reflectores acústicos amarrados, dejados como señal de las fumarolas, se guiaron siete sismómetros de fondo hacia la posición. Si la emanación hidrotermal tenía alguna "rúbrica" sísmica reveladora, quizá pudiéramos determinar a qué profundidad penetraba. De momento, los resultados han sido alentadores. Los terremotos de la región parecen ser someros: originados a sólo dos o tres kilómetros de profundidad, como mucho. Este hallazgo, que concuerda perfectamente con indicios anteriores de que el techo de la cámara magmática era delgado, da un límite superior verosímil para la profundidad de la parte agrietada de la corteza.

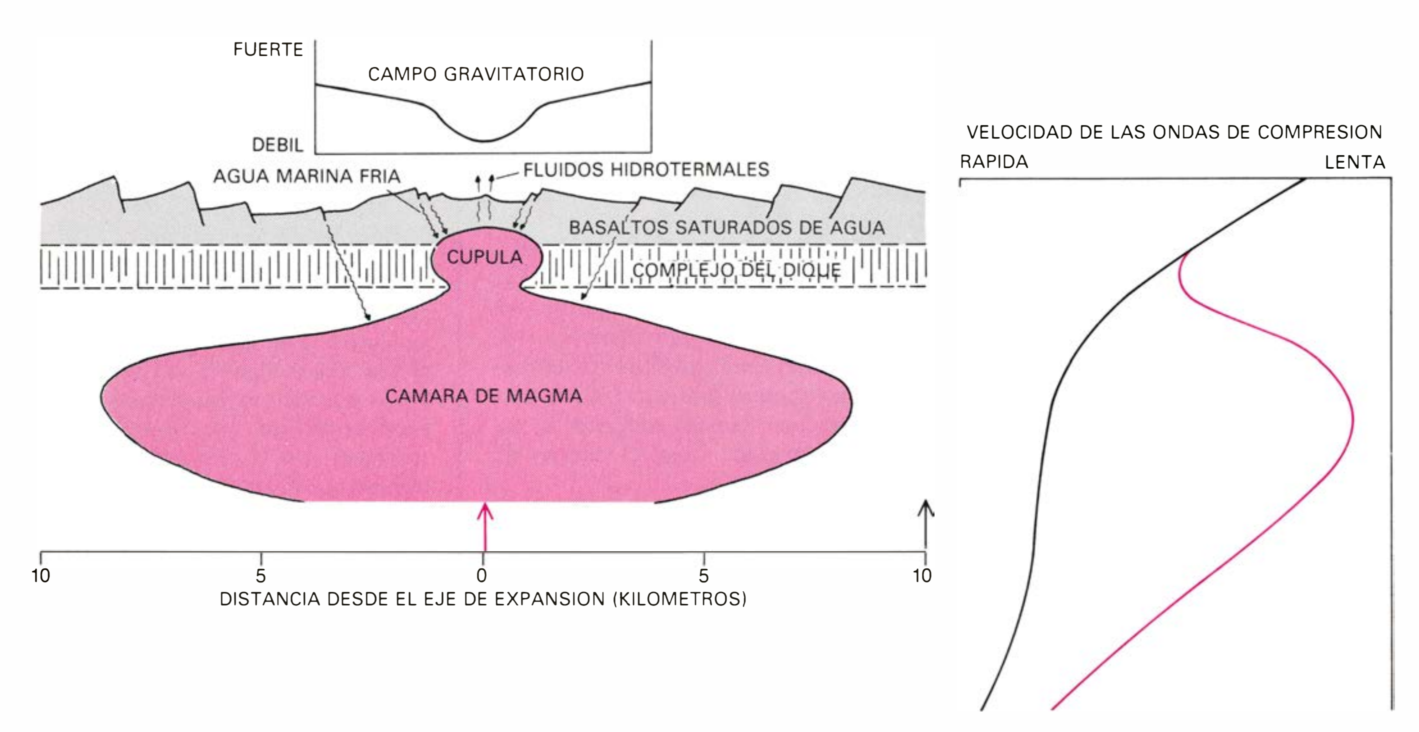
Entre los acontecimientos sísmicos registrados por los aparatos se cuentan terremotos leves de un tipo peculiar, los llamados temblores armónicos. Hubo temblores de este tipo asociados a la erupción catastrófica del monte Santa Elena, hace un año, y constituyen un signo seguro de actividad volcánica inminente o reciente. Antes de, y durante, la erupción volcánica fue aumentando la frecuencia de los temblores, hasta que éstos se hicieron casi continuos. Nuestros registros de la dorsal del Pacífico oriental revelan un descenso parecido, señalando hasta varios centenares de sacudidas por hora. Es posible que este segmento de la dorsal esté saliendo o entrando en una fase volcánica activa.

Anomalías gravitarias

En el *Alvin,* Spiess y uno de nosotros (Luyendyk) realizaron una serie de mediciones gravimétricas estrechamente relacionadas con los experimentos sísmicos. Como en el caso de las ondas sísmicas, el campo gravitatorio local debía verse alterado por variaciones de densidad de la corteza, debidas a fisuración o a la presencia de una cámara magmática somera. Son débiles las anomalías gravitatorias esperadas; resulta difícil medirlas desde la superficie a causa de lo lejos que queda de la fuente el receptor y debido, también, a señales de falsa aceleración registradas por los sensores de a bordo. Una vez más, el *Alvin* trajo la solución. Al medir el campo gravitatorio desde el sumergible, posado y quieto sobre el fondo, se reducían las aceleraciones falsas. Además, su proximidad a la fuente reforzaba la señal registrada por el gravímetro.

Las mediciones de gravedad, efectuadas a lo largo de un perfil de siete kilómetros desde la zona 1 hasta la zona 3, indicaron una acusada anomalía gravitatoria negativa sobre la zona neovolcánica. Aparentemente, la anomalía se concentra en la dorsal volcánica central y ocupa una extensión apreciable de las zonas 1 y 2. Revela una región de densidad menor que la media, fenómeno que podría obedecer a fisuración de la corteza o a la presencia de una cámara magmática somera. Las observaciones geológicas revelan un máximo de fisuración en la zona 2, mientras que la anomalía gravitatoria negativa se centra en la zona 1, relativamente poco fisurada. Este dato insinúa (si bien no lo demuestra del todo) que la anomalía gravitatoria la produce una cámara magmática de escasa profundidad.

Si se supone que la cámara de magma se dispone como un cilindro horizontal de eje paralelo a la dorsal y centrado directamente bajo el mínimo medido en el campo gravitatorio, los datos de gravedad indican que el centro



MODELO DE LA CORTEZA TERRESTRE bajo la dorsal del Pacífico oriental, representado por un corte basado principalmente en mediciones geofísicas. El agua fría penetra a través de grietas y fisuras por las rocas del centro de expansión y se acerca a la roca fundida, que forma una cúpula alargada sobre la cámara magmática principal. Calentada por el magma, el agua sale expulsada a través de las fumarolas, a lo largo del eje del centro de expansión. La existencia de una cúpula y de actividad hidrotermal se supone episódica, ligada, por lo general, a períodos de vulcanismo y movimiento tectónico intensos. Las propiedades geofísicas representadas a la derecha son sensibles tanto a la permeabilidad de la corteza como a la presencia de la

del cilindro se halla a unos 1000 metros bajo el fondo oceánico. Si se presupone, además, que la cámara está llena de basalto fundido, su densidad debería ser 0,21 gramos por centímetro cúbico más baja que la de la roca circundante. Este cálculo implica, a su vez, que el límite superior del cilindro se encuentra a unos 600 metros bajo el fondo del mar. Si se supusiera una menor diferencia de densidad entre el magma de la cámara y la roca adyacente, habría que pensar en una masa de magma mayor y más próxima a la superficie de la corteza.

De acuerdo con los resultados sísmicos, resulta más verosímil que la cámara magmática principal posea unas dimensiones mucho mayores y llegue a mayor profundidad. En realidad, por razones geológicas, parece probable que la parte principal y permanente de la cámara se halle entre dos y seis kilómetros bajo el fondo oceánico, y que su anchura doble o triplique su profundidad. La estructura aparente a partir de los datos de gravedad quizá no corresponda a la cámara principal, sino a una pequeña cúpula alargada y transitoria, a un domo, en el ápice de la cámara principal. Esta cúpula podría ocupar toda la zona 1 y proveer el magma necesario para alimentar las coladas de lava que hay allí.

La magnitud de la anomalía gravitatoria negativa corresponde a una deficiencia de masa bajo el eje del centro de expansión de unos 90 millones de kilogramos por metro de dorsal. Si en el centro de expansión la corteza está en equilibrio isostático (es decir, con las fuerzas gravitatorias y de flotación equilibradas, en algún punto del fondo oceánico tiene que haber un exceso de masa que compense su deficiencia en profundidad. La zona 1 es un bloque topográficamente levantado de un kilómetro de anchura y unos 20 a 30 metros más alto que el terreno que lo rodea. Con todo, su altura es sólo la mitad de la que debería alcanzar para mantener el equilibrio isostático en el eje del centro de expansión. O bien la deficiencia de masa se compensa mediante otros accidentes topográficos más distantes del eje, o bien el rozamiento a lo largo de planos de falla provoca un hundimiento del bloque central opuesto a la fuerza de flotación.

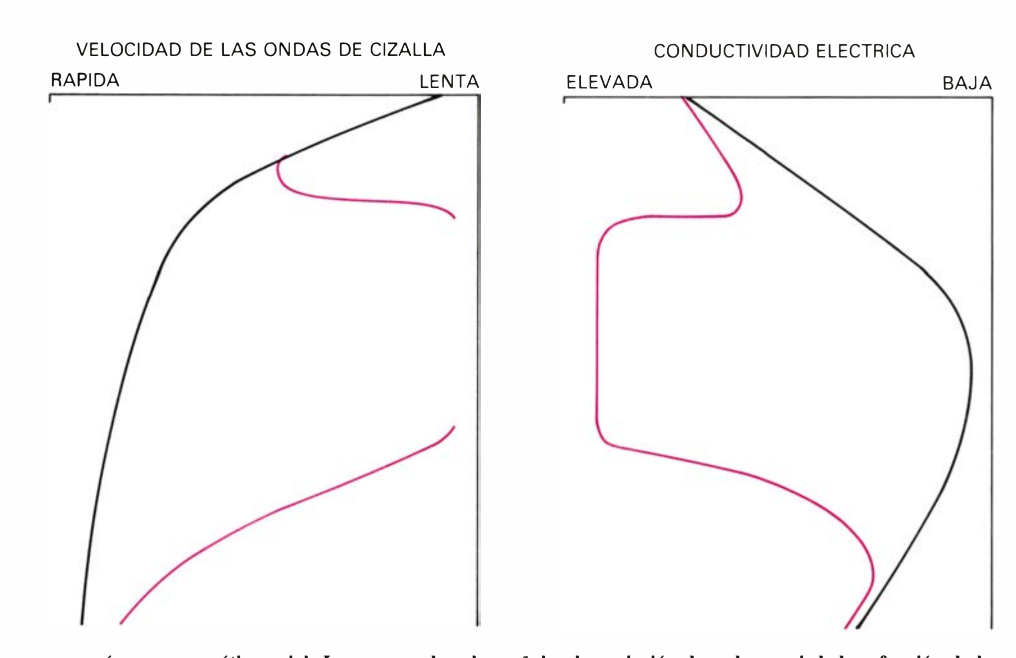
Mediciones eléctricas

Las mediciones de anomalías gravitatorias dan también una idea de la densidad de la masa que ocupa los 100 metros superiores de la topografía del fondo. A lo largo de la cresta de la dorsal, la masa presenta una densidad de unos 2,6 gramos por centímetro cúbico, que contrasta con la de 2,9 gramos por centímetro cúbico que tienen unas 90 muestras de roca sacadas del fondo. La discrepancia sugiere una porosidad de la topografía cercana al 15 por ciento.

La presencia de agua en las rocas de la corteza puede detectarse directamente por medio de la conductividad eléctrica del agua. A la conductividad eléctrica también se le puede sacar partido a profundidades mayores para detectar la cámara magmática axial, por cuanto el magma tiene una conductividad mucho mayor que el basalto sólido. Con este fin, Charles S. Cox, del Instituto Scripps, ideó una técnica nueva de sondaje eléctrico. El experimento se diseñó con el propósito siguiente: lograr más información sobre la filtración de agua marina a través de la corteza, sobre la profundidad de fisuración y sobre la extensión lateral de la cámara magmática. Hasta entonces, ni se habían hecho intentos parecidos, ni se había conseguido determinar la conductividad de la corteza submarina mediante otras técnicas.

El buque oceanográfico *Melville,* del Instituto Scripps, arrastraba un dipolo eléctrico-antena de 800 metros de longitud. La antena transmitía señales eléctricas al océano y a la corteza, a una frecuencia seleccionada de suerte tal que la señal fuera absorbida con rapidez por el océano y penetrara en la corteza hasta un buen trecho. Se colocaron tres receptores sobre el fondo, cerca del centro de expansión. Se evitó la topografía escabrosa de la zona 1: este experimento era nuestro primer intento de arrastrar una antena grande y frágil cerca del fondo. Los sondeos eléctricos se efectuaron en un área de 10-15 kilómetros al oeste del eje de expansión, sobre una corteza de entre 300.000 y 400.000 años de antigüedad.

Se sondeó hasta unos ocho kilómetros de profundidad bajo el fondo oceánico. El modelo de conductividad nos mostraba que, a sólo 10-15 kilómetros del eje de expansión, la cámara magmática mide menos de 200 metros de grosor. Ello confirma vigorosamente los experimentos sísmicos que insinuaban que la cámara magmática axial era angosta. Las observaciones llevadas a cabo desde el *Cyana* indican que el fallamiento activo de la corteza disminuye a 10-12 kilómetros de distancia del eje. Tal vez, la anchura de la cámara de magma determina la anchura de la faja de fallamiento tectónico activo en centros de expansión entre moderada y rápida. Otro descubrimiento logrado con el sondaje eléctrico fue a la baja conductividad de la parte relativamente próxima a la superficie del fondo marino. Lo que significa que la penetración de agua marina en la corteza no



cámara magmática axial. Las curvas de color señalan la variación de cada propiedad en función de la profundidad en el propio centro de expansión; las curvas en negro representan la variación con la profundidad a unos 10 kilómetros del centro de expansión. También se esquematiza (*a la izquierda, arriba*) una anomalía gravitacional que se midió; tales variaciones de intensidad del campo gravitacional, detectadas en el fondo oceánico, revelan la estructura somera de la corteza y de la cámara de magma.

rebasa los dos o cuatro kilómetros de profundidad.

Inversiones magnéticas

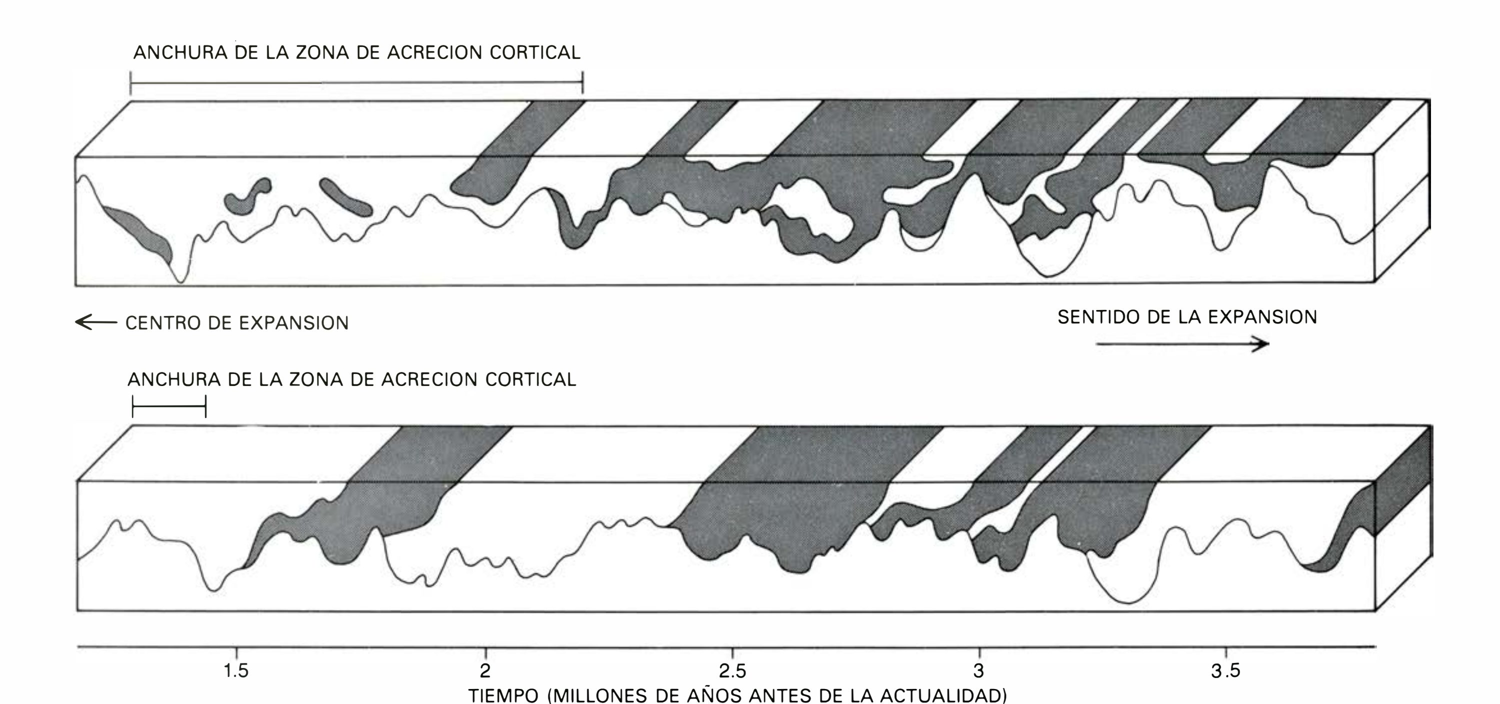
En otra serie de inmersiones investigamos a cierta distancia del eje de la dorsal y al noroeste del borde de la banda de inversión magnética importante y más reciente. Se pretendía ver en qué medida la geometría de este límite podía revelarnos la formación de corteza oceánica nueva a lo largo del eje de expansión. A casi veinte años de haber sido propuesto el modelo de Vine y Matthews, no conocemos todavía los pormenores de la formación de esas bandas. Hubo un tiempo en que privó la opinión de que la mayoría de las señales magnéticas asociadas a bandas de inversión magnética estaban confinadas a los 500 metros superiores de la corteza oceánica. Pero los testigos oceánicos de capas profundas de la corteza han revelado una mezcla caótica de polaridades e intensidades magnéticas que no coincide en absoluto con la sucesión lineal de bandas magnéticas medidas desde la superficie del mar.

En la primera etapa del estudio construimos un modelo matemático tridimensional del límite de las inversiones magnéticas, fundado en mediciones anteriores efectuadas con un magnetómetro arrastrado en profundidad. A partir del modelo, calculamos que el límite era notoriamente recto y angosto: menos de 1,4 kilómetros de ancho. Sin embargo, para conseguir una solución estable hubo que expurgar los datos, lo que nos llevó a sospechar que el límite no estuviera realmente bien definido. Para averiguar la disposición real de las bandas magnetizadas opuestas en el fondo oceánico, montamos un magnetómetro más sensible en el *Alvin.* El instrumento midió las componentes del campo magnético en tres dimensiones, así como el gradiente vertical del campo (el ritmo al cual cambia el campo, en función de la altura sobre el fondo oceánico). En este primer intento de estudiar de cerca un límite de inversión magnética submarina se nos unieron Loren Shure, del Instituto Scripps, y Stephen P. Miller y Tanya M. Atwater, de la Universidad de California en Santa Bárbara.

En cinco inmersiones a través de los límites de inversión magnética logramos identificar con nitidez la polaridad magnética de más de 250 afloramientos de basalto. Los resultados de la exploración magnética resultaron sorpren-



LA POLARIDAD MAGNETICA DE LA CORTEZA se midió mediante instrumentos instalados en el *Alvin* en más de 250 estaciones dispuestas a lo largo de una serie de cruceros efectuados cerca del límite de una inversión magnética. El signo más designa polaridad positiva (idéntica al sentido actual del campo) y el signo menos, polaridad negativa. Las mediciones realizadas sobre el fondo oceánico desde el *Alvin* se han superpuesto sobre un mapa de límites de inversiones magnéticas basado en datos recabados desde un buque de superficie. En este mapa, la parte gris es positiva, y la coloreada, negativa. En cada caso, la zona de transición aparece muy nítida, lo que indica que la corteza oceánica se crea en una banda estrecha (de un kilómetro de anchura, aproximadamente). El límite que sugieren las mediciones de fondo está unos 500 metros al noroeste de la posición calculada a partir de los datos registrados desde superficie; posiblemente, ello se debe al derrame de material de polaridad positiva sobre roca polarizada negativamente.



EN LA DISTRIBUCION de las polaridades magnéticas en la corteza oceánica influye la anchura de la zona de expansión, según se indica en dos perfiles hipotéticos construidos estadísticamente por Hans Schouten y Charles Denham, del Instituto Oceanográfico Woods Hole. En el diagrama superior, se ha supuesto un ritmo de expansión lento y, ancha, la zona de acreción (lugar donde emerge corteza nueva), condiciones dominantes en la dorsal mesoatlántica. En el diagrama inferior, la zona de acreción es estrecha, como es el caso en la dorsal del Pacífico oriental. El grosor de la corteza depende, por un lado, de la velocidad de expansión, y por otro, de la frecuencia de las erupciones volcánicas. El grado de mezcla de porciones de magnetismo opuesto varía de acuerdo con la anchura de la zona de acreción. Se considera que en los centros de expansión lenta la anchura es mayor. Ilustración de A. Tomko.

dentes. Incluso en cruceros largos, efectuados a ambos lados del límite, cada afloramiento magnético presentaba la polaridad correcta, es decir, la misma polaridad que la banda magnética regional definida por el magnetómetro de arrastre de fondo. Esta observación no aportó mayor interés por lo que respecta al lado más moderno del límite: era de esperar que corteza más reciente de polaridad positiva (corteza con la misma polaridad que el actual campo magnético terrestre) se superpusiera a corteza más antigua negativamente polarizada. Lo sorprendente fue que no hubiera porciones aisladas de corteza nueva en el lado más antiguo del límite.

Detectamos que el límite de inversión magnética explorado desde el *Alvin* se hallaba desplazado unos 500 metros más al noroeste del eje de expansión que la posición del límite calculada a partir de los datos obtenidos con el magnetómetro de arrastre de fondo. El límite calculado señalaba la posición media de la inversión magnética en un corte transversal de la corteza hasta cierta profundidad. El hecho de que el límite cartografiado directamente sobre el fondo oceánico se halle a 50 metros al noroeste de la posición media calculada indica un desbordamiento de basalto, desde las fumarolas, por encima de corteza más antigua de polaridad negativa.

Los datos obtenidos desde el *Alvin,* junto con otras mediciones anteriores, revelan que las bandas magnéticas se forman en una zona muy estrecha. Teniendo en cuenta la extensión de la corteza por fallamiento y el período finito requerido para que el campo magnético se invierta, parece que la anchura de la zona de formación cortical sólo debe medir entre 500 y 1000 metros. Este resultado concuerda perfectamente con las observaciones geológicas efectuadas con el *Alvin* y el *Cyana,* en relación con la anchura de la zona 1, que varía entre 400 y 1200 metros en el actual eje de expansión. Así pues, la zona de formación cortical, tanto la actual como la de hace 700.000 años, está nítidamente definida: tiene apenas un kilómetro de ancho. Considerando las dimensiones laterales de las placas pacífica y norteamericana, de millares de kilómetros de extensión, llama la atención que el centro de expansión que las separa sea tan estrecho y tan estable.

¿Cómo se puede reconciliar este cuadro de bandas bien ordenadas con la compleja estratigrafía magnética observada en los testigos oceánicos? Los sondeos que penetraron hasta más de 500 metros en el interior de la corteza oceánica se realizaron todos en la cuenca atlántica, cuya velocidad de expansión es mucho más lenta. Estudios estadísticos muestran que, a unos ritmos tan lentos, una zona de formación de corteza más ancha, de varios kilómetros, genera corteza con una mezcla compleja de polaridades magnéticas. Con una expansión más rápida y una zona de formación cortical más angosta (condiciones reinantes en la dorsal del Pacífico oriental), las bandas magnéticas ostentan una tendencia mayor a la homogeneidad magnética y son más definidos los límites de las bandas.

De esta argumentación se desprende que los procesos físicos que originan corteza oceánica nueva en el Atlántico difieren por completo de los del Pacífico. Los esfuerzos futuros para desentrañar los complejos procesos físicos y químicos que tienen lugar cerca de los límites de las grandes placas litosféricas exigirán experimentos adicionales *in situ,* en los cuales el sumergible tripulado seguirá desempeñando un papel esencial. Uno de los resultados más gratificadores de estos estudios es la unificación de muchos campos dispares en la labor oceanográfica. Biólogos, geoquímicos, geólogos, geofísicos y físicos están todos empeñados en una búsqueda común para comprender la expansión del fondo oceánico en las dorsales mesoceánicas.

Sistemas de contracorriente en los animales

Los intercambios entre dos fluidos que se desplazan en sentidos opuestos constituyen el fundamento de diversas estratagemas que permiten a muchos animales sobrevivir adecuadamente en un ambiente inhóspito

Knut Schmidt-Nielsen

Cuando un científico obtiene resultados para los que no halla explicación, o bien éstos son erróneos o está sobre la pista de alguna novedad. Hace más de diez años, Eugene C. Crawford, Jr., de la Universidad de Kentucky, Harold T. Hammel, del Instituto Oceanográfico Scripps, y el autor medían el grado de evaporación de agua en el tracto respiratorio del camello. Sabíamos que el aire inhalado por un mamífero se enriquece en agua al pasar sobre las superficies húmedas que revisten la cavidad nasal y la tráquea, de forma que, cuando el aire llega a los pulmones, está saturado de vapor de agua. Sería de esperar que el aire siguiera saturado cuando el animal lo exhala. A partir de la temperatura y el volumen del aire espirado, es fácil calcular entonces cuánto vapor de agua debería contener. Nuestros resultados fueron sorprendentes: la pérdida de agua medida en camellos a los que se les había limitado la ingestión de ésta resultó a veces mucho menor que lo que habíamos vaticinado.

La explicación más probable consistía en admitir que habíamos cometido un error en nuestras determinaciones. Pero finalmente tuvimos que aceptar que las mediciones eran correctas. Con Robert C. Schroter, del Imperial College de Ciencia y Tecnología de Londres, y Amiram Shkolnik, de la Universidad de Tel Aviv, confirmé en 1979 los resultados originales. Para medir la humedad relativa contábamos con transductores de precisión y de respuesta rápida, que habían sido desarrollados por aquel entonces. Podíamos ya asegurar que estábamos sobre la pista de un mecanismo fisiológico inédito. Este mecanismo le permite al camello recuperar vapor de agua del aire expelido a través de sus conductos nasales, de suerte que el aire exhalado tenga una humedad relativa notablemente inferior al 100 por cien. El mecanismo resulta bastante sencillo. Se basa en el mismo principio que siguen muchos animales para conservar el calor corporal. En esencia consiste en un sistema de intercambio de contracorriente, en el que, por ejemplo, se transmite calor entre líquidos o gases que circulan en sentidos opuestos. En el camello, la situación se complica porque se dan varios procesos interdependientes y superpuestos. Será útil, por tanto, describir antes un sistema más simple.

Hace unos 25 años, P. F. Scholander, a la sazón en el Instituto Oceanográfico Woods Hole, describía un mecanismo que contribuía a disminuir la pérdida de calor que se da a través de las aletas del cuerpo y de la cola de las ballenas, cuando éstas nadan en las heladas aguas de los mares polares. Este sistema se basa en la misma ley física que rige principalmente la pérdida de calor corporal, es decir, la ley de que el calor siempre fluye "cuesta abajo" (a favor de gradiente), de una temperatura más elevada a otra inferior. Las venas que retornan la sangre desde las aletas hacia el cuerpo discurren muy próximas a arterias. De hecho, cada arteria está rodeada de estas venas. Por consiguiente, la sangre caliente que fluye hacia las citadas aletas está rodeada de una capa de sangre fría que circula en sentido opuesto. Gran parte del calor de la sangre arterial no alcanza la periferia, sino que se transfiere a la sangre venosa, más fría, que, de esta forma, se precalienta antes de su regreso a la zona central del cuerpo.

Una disposición en contracorriente similar de las arterias y las venas se encuentra en las extremidades de muchos animales. Así, en las patas de las aves zancudas y en la cola del castor. En el atún, un mecanismo de contracorriente sirve para mantener elevada la temperatura de los músculos de la natación, devolviéndoles el calor que ellos mismos producen. Con lo que se conservan los músculos a una temperatura superior a la del resto del cuerpo del pez y a la del agua en que nada.

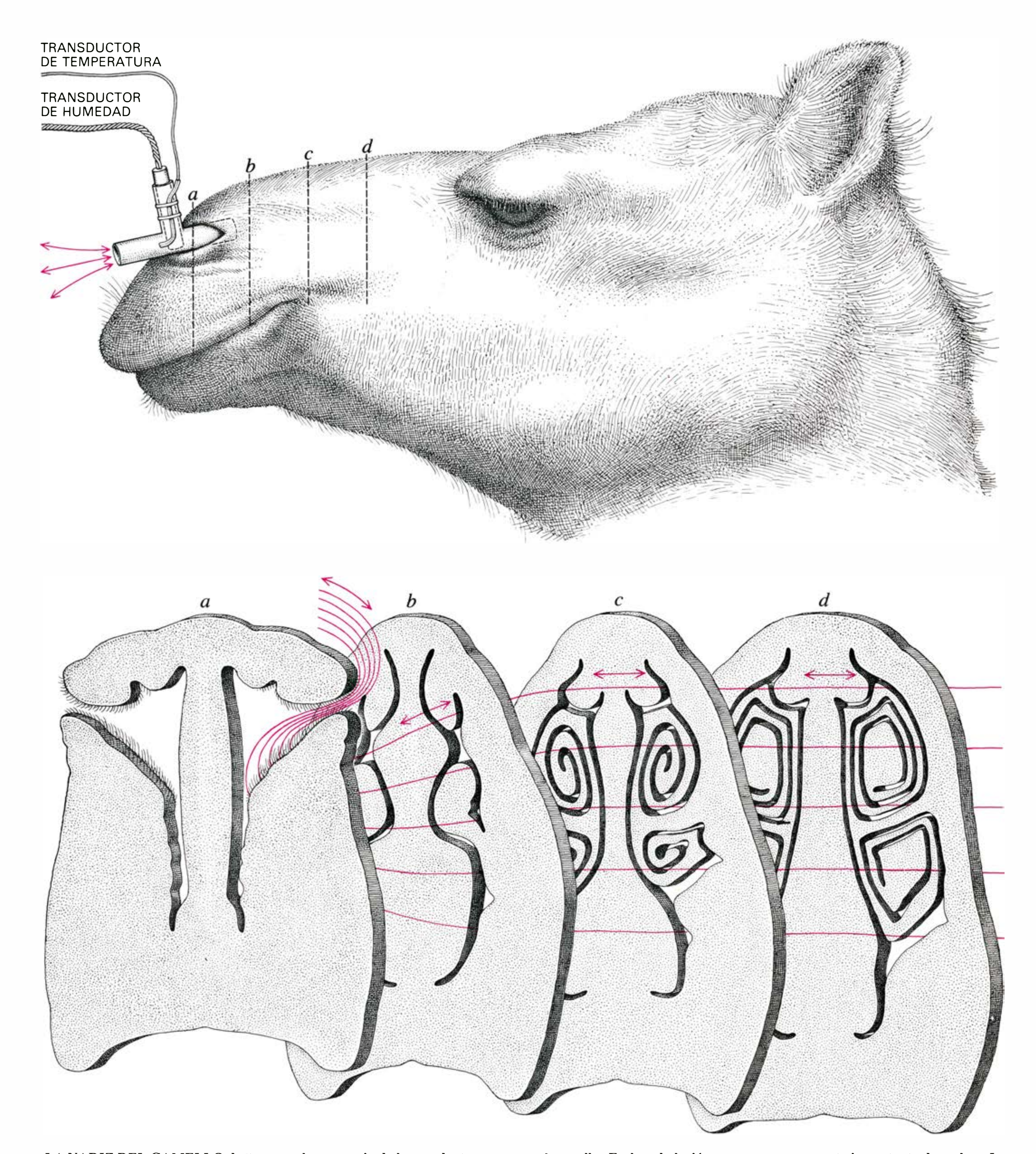
La circulación de tipo contracorriente es también el principio operativo de los dispositivos de intercambio térmico que retienen el calor en muchos procesos industriales. En una planta calefactora, por ejemplo, se consigue un gran ahorro energético si se utilizan los gases de escape a alta temperatura para precalentar el aire que entra en el horno. Este precalentamiento devuelve al horno parte del calor que, de otro modo, se perdería.

Imaginemos que el proceso de regeneración de calor requiera un calentamiento discontinuo o pulsátil del aire de entrada. Para conseguir este sistema podrían dirigirse los gases de escape calientes a través de un conjunto de serpentines de cobre y conducir después el aire entrante a través de los serpentines, a ser posible en sentido opuesto. En la primera parte del ciclo, los serpentines almacenarían el calor procedente de los escapes; en la segunda, el calor se transferiría al aire incidente. La situación es similar cuando respira un mamífero. El aire inhalado se calienta al circular por los conductos nasales y tracto respiratorio superior, de forma que alcanza los pulmones precalentado a la temperatura corporal. Al exhalar, el aire caliente pasa sobre las superficies del tracto, refrigeradas un momento antes por el aire entrante. En consecuencia, el aire espirado cede parte de su calor y la nariz actúa de regenerador térmico.

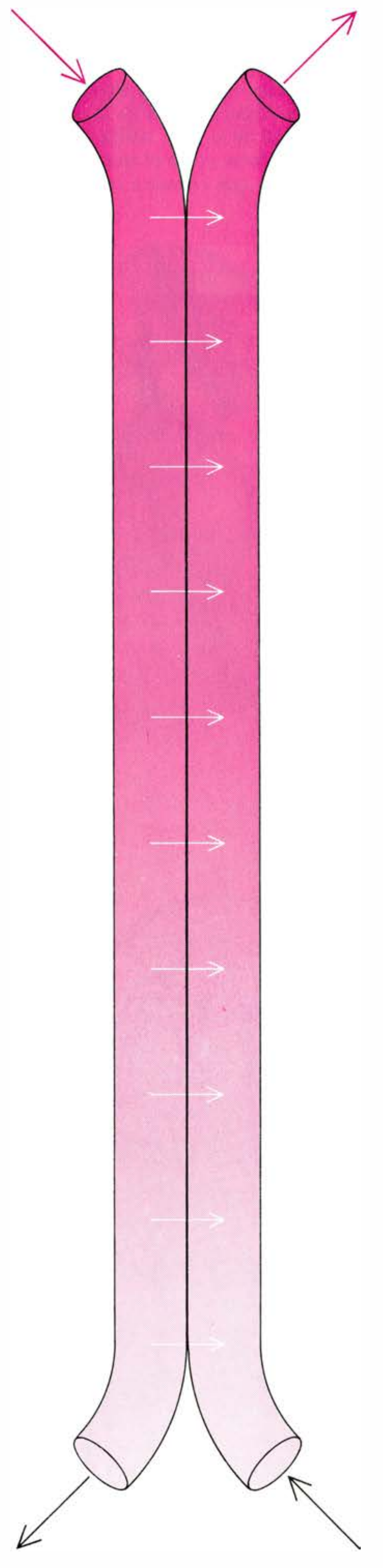
Tuve conciencia por primera vez de la importancia del intercambio nasal de calor al realizar estudios en ratas canguro (*Dipodomys spectabilis*) de los desiertos de Arizona. La rata canguro

nunca bebe agua y debe economizar al máximo la pequeña cantidad que recaba de los alimentos. Cuando medí la temperatura del aire exhalado a la salida de la nariz con un termopar, encontré que era inferior a la corporal en varios grados. Ya he explicado la razón: el aire inhalado enfría la nariz y ésta, a su vez, hace lo mismo con el aire exhalado. Se forma, pues, un gradiente térmico que se extiende desde el extremo de la nariz hacia el interior, hasta que se alcanza la temperatura corporal, a unos 20 milímetros de profundidad.

Puede simularse la nariz de la rata canguro mediante un modelo sencillo: una caja estrecha y abierta en sus dos extremos. Supongamos que la pared de la caja está inicialmente a la temperatura del cuerpo del animal, alrededor de 38 grados Celsius. Al entrar el aire por un extremo de la caja, enfría las paredes; ahora bien, como el aire se calienta a medida que circula a través de la



LA NARIZ DEL CAMELLO destaca por la presencia de los conductos arrollados a manera de pergamino constituidos por los llamados turbinales, que contribuyen a formar una superficie interna de más de 1000 centímetros cuadrados. Los turbinales ceden calor y vapor de agua al aire inhalado por el camello. En la exhalación, recuperan una parte importante de ambos. La cavidad nasal es, pues, el punto donde se localizan los intercambios entre contracorrientes que conservan energía y agua. La temperatura y la humedad relativa del aire respirado pueden determinarse por medio de transductores.



caja, el enfriamiento de las paredes es progresivamente más pequeño. Antes de que el aire alcance el otro extremo de la caja (equivalente a los pulmones) se ha calentado hasta alcanzar la temperatura corporal. Al exhalar, el aire caliente cede calor a las paredes. Si el intercambio térmico fuera completo, el aire saldría de la caja a la misma temperatura que tenía al entrar.

En nuestros experimentos con ratas canguro que respiraban aire seco, la temperatura de éste a la salida de la nariz resultó ser inferior en varios grados a la del aire entrante. Por ejemplo, cuando una rata inhalaba aire seco a 28 grados C, la temperatura del aire exhalado era de 23 grados. Esto es también fácil de explicar. Cuando el animal inhala aire seco, el agua de la superficie húmeda de la cavidad nasal se evapora, haciendo que la temperatura de la superficie descienda por debajo de la del aire. El agua toma de la superficie el calor necesario para su paso de líquido a gas. Los conductos nasales de la rata canguro son muy estrechos: el espacio comprendido entre sus superficies internas es de sólo una fracción de milímetro. El intercambio de calor entre el aire circulante y la nariz se realiza, en consecuencia, con bastante rapidez; la temperatura del aire que sale se diferencia sólo en pocas décimas de grado de la temperatura de la punta de la nariz. Así pues, el aire exhalado es más frío que el inhalado.

Ya que el aire espirado es más frío que el inspirado, podría argüirse que la rata canguro extrae calor del aire y lo retiene para mantener elevada su temperatura. Esta conclusión pasa por alto el hecho de que el aire exhalado a menor temperatura está totalmente saturado de vapor de agua, mientras que el inhalado es aire seco. En el cálculo del contenido total de calor del aire debe incluirse, en consecuencia, el calor necesario para la evaporación del agua. Como el aire espirado contiene agua y el inspirado no, el animal pierde agua. Esta pérdida encuentra dificultades: el aire frío posee menor capacidad de contenido de agua que el aire caliente.

SISTEMA DE CONTRACORRIENTE, que transfiere calor entre dos fluidos que se desplazan en sentidos opuestos. Un fluido caliente entra por la parte superior del tubo de la izquierda; otro, frío, penetra por la parte inferior del tubo de la derecha. Los dos tubos son adyacentes y, por consiguiente, el calor se propaga desde el tubo caliente hasta el frío. Se establece, así, un gradiente de temperatura (*color*) y se tiende a conservar el calor en un extremo del sistema. El intercambio por contracorriente se aplica para mantener el calor en procesos industriales, en la destilación, por ejemplo.

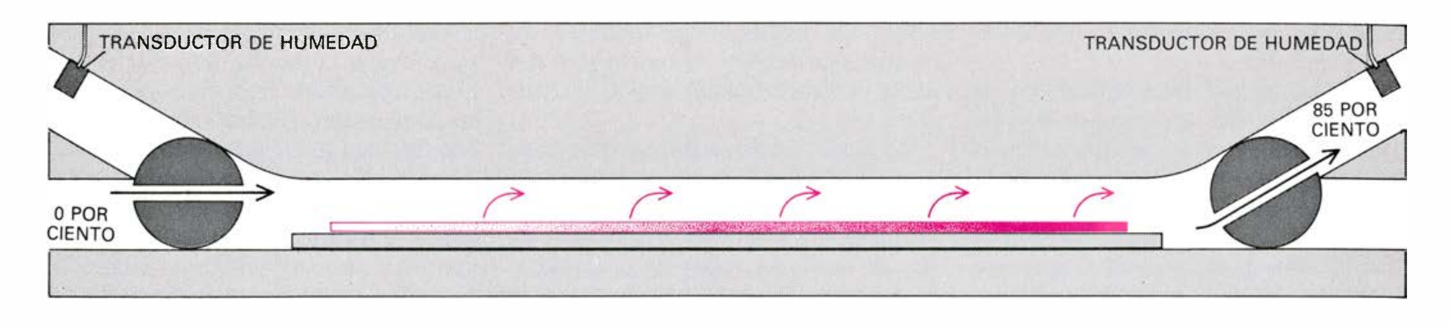
¿Qué importancia tiene, en la conservación del agua, el enfriamiento del aire exhalado? La respuesta depende de la temperatura a que se halle el aire ambiental y de la cantidad de vapor de agua que encierre. Supongamos que la temperatura ambiente es de 30 grados C y que la humedad relativa es del 25 por ciento. En estas condiciones, una rata canguro exhala el aire a 27 grados C y al 100 por ciento de humedad relativa. Para efectuar algún cálculo explícito, imaginemos que durante un período determinado de tiempo la rata inhala un litro de aire. Para calentar este volumen de aire hasta la temperatura corporal de 38 grados se requiere el aporte de 2,4 calorías. La saturación de este aire con vapor de agua precisa de la vaporización de 43,8 miligramos de agua, con un costo energético de 25,3 calorías. El gasto total de energía necesario para calentar y humedecer el aire es, pues, de 27,7 calorías.

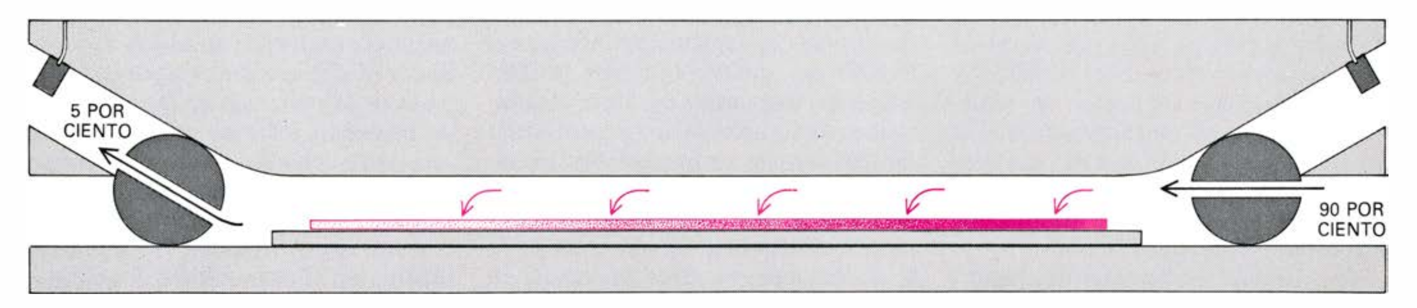
¿Qué proporción de este calor se recupera? El enfriamiento del aire hasta la temperatura de 27 grados libera 3,3 calorías. El aire permanece totalmente saturado. Ahora bien, puesto que a la temperatura más baja contiene menos cantidad de vapor de agua, se vuelven a condensar en la nariz unos 23,6 miligramos de agua. Al condensarse, el agua libera su calor de vaporización, lo que supone la recuperación de 13,7 calorías. En suma, el animal recobra 17,0 calorías, es decir, el 67 por ciento de la energía total que había utilizado para calentar y humedecer el aire. También se recupera el 54 por ciento del agua.

La cantidad de agua recuperada depende de las condiciones ambientales. A una temperatura de 15 grados y una humedad relativa del 25 por ciento se vuelve a condensar hasta el 88 por ciento del agua utilizada para saturar el aire inhalado. El enfriamiento en la región nasal del aire espirado tiene, pues, una gran importancia en el balance de agua de la rata canguro.

Los fisiólogos que se dedican al estudio de la respiración en el hombre no han prestado mucha atención al intercambio térmico en las vías respiratorias. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que en el tracto respiratorio superior del cuerpo humano el aire exhalado se enfría hasta una temperatura inferior sólo en dos grados a la del núcleo central del cuerpo.

La razón que explica la pequeña cuantía de este enfriamiento es sencilla. En el cuerpo humano, el intercambio térmico entre el aire circulante y las paredes de la cavidad nasal dista mucho





MODELO DE LA NARIZ DEL CAMELLO diseñado por el autor para demostrar que este animal, contrariamente a lo que sucede con el hombre, puede exhalar aire que no esté totalmente saturado de vapor de agua. El modelo consta de una cámara estrecha y rectangular por donde circula aire. Una tira de papel de filtro situada en el interior simula el poder absorbente de la superficie interna de la cavidad nasal. El modelo "inhala" y "exhala" alternativamente. Al inhalar (*diagrama superior*) entra aire seco por la izquierda; al exhalar (*diagrama inferior*) entra aire húmedo por la derecha. La humectación simula el humedecimiento que se produce en el aire inhalado. Tras unos minutos se establece un estado de equilibrio: el papel de filtro absorbe humedad (*color*) del aire exhalado y la libera en el inhalado. Este intercambio reduce considerablemente la humedad relativa del aire exhalado.

de ser absoluto, en parte porque los conductos nasales son amplios y en parte porque el área total de su superficie interior es relativamente pequeña. Lo que parece muy probable, y constituye una causa aún más importante, es que la superficie de la cavidad nasal permanezca caliente porque el flujo circulatorio en ella sea relativamente grande.

El hombre exhala aire a una temperatura próxima a la del cuerpo; de donde resulta que la recuperación, tanto de calor como de agua, es prácticamente despreciable. Sin embargo, el calentamiento y la humectación del aire durante la inhalación son importantes. Esta relevancia se pone de manifiesto en una complicación de carácter grave que acompaña con frecuencia al procedimiento quirúrgico de la traqueotomía, en el que se practica una abertura desde la tráquea hasta el exterior del cuerpo. Después de practicada la traqueotomía, el aire que inhala el paciente pasa a la tráquea sin haber sido calentado y humedecido en la nariz. Esto conduce a la desecación de la tráquea y a la formación de costras en su superficie.

La mejor medida que puede tomarse para salir al paso de este problema es humedecer el aire inhalado. A tal efecto, el físico sueco Nils Toremalm ha inventado un dispositivo que funciona de manera similar a la nariz de la rata canguro. Los elementos activos de este invento son dos tiras de lámina de aluminio, un plana y otra ondulada. Cada tira mide cuatro metros de longitud, tres centímetros de anchura y 0,5 milímetros de espesor. Las dos están arrolladas conjuntamente y ajustadas en el interior de un cilindro de plástico, donde dan lugar a un área de intercambio térmico y acuoso de unos 4000 centímetros cuadrados. Un extremo del cilindro de plástico permanece abierto; el otro extremo está conectado a la cánula traqueal, es decir, al tubo colocado a través de la abertura practicada en la tráquea. Cuando el paciente exhala, el agua se condensa en las láminas. En la inhalación subsiguiente, el vapor de agua es restituido a la tráquea y a los pulmones. La pérdida de agua a través del tracto respiratorio es sólo la mitad de la que tendría lugar sin este sistema.

Si el enfriamiento del aire exhalado es insignificante en el hombre, ¿por qué no habría de serlo también en otros animales de tamaño parejo o mayor? La verdad es que caballos, antílopes y camellos tienen ventanas nasales amplias, al igual que ocurre en el hombre. Ello podría indicar que, en los animales grandes, el intercambio de calor entre el aire y la superficie de la cavidad nasal es escaso. De ahí que, durante varios años, mis colegas y yo prestásemos poca atención a dichos animales. Fue un error. No habíamos tenido en cuenta la gran longitud de las vías nasales de la mayoría de los macromamíferos ni la correspondiente extensión del área de su superficie.

Hace algunos años, Schroter y yo, en colaboración con Vaughan A. Langman, de la Universidad de Harvard, y Geoffrey M. O. Maloiy, de la de Nairobi, estudiamos el intercambio respiratorio de varias especies de grandes ungulados del Africa oriental. En la jirafa, por ejemplo, observamos que, cuando la temperatura del aire ambiental era de 21 grados C, la del exhalado era de 28 grados, es decir, inferior en 10 grados a la temperatura del cuerpo del animal. En estas condiciones, hasta el 56 por ciento del agua que se había evaporado durante la inhalación se recuperaba al exhalar. Estimamos que el intercambio de calor en la nariz de la jirafa podía reducir la pérdida respiratoria de agua de 1,5 a 3 litros diarios. En la seca sabana del Africa oriental, este último valor puede suponer hasta un quinto del requerimiento hídrico diario de la jirafa.

Aunque el enfriamiento del aire exhalado puede representar un ahorro sustancial de agua en animales como la jirafa y la rata canguro, el aire espirado a temperatura más baja sigue estando saturado de vapor de agua. En el caso del camello, sin embargo, nuestros cómputos habían demostrado no sólo que el aire se enfriaba, sino que, además, se exhalaba con una humedad relativa inferior al 100 por ciento. Estos resultados serían inexplicables, a menos que otros mecanismos fisiológicos

retuvieran una cantidad adicional de vapor de agua.

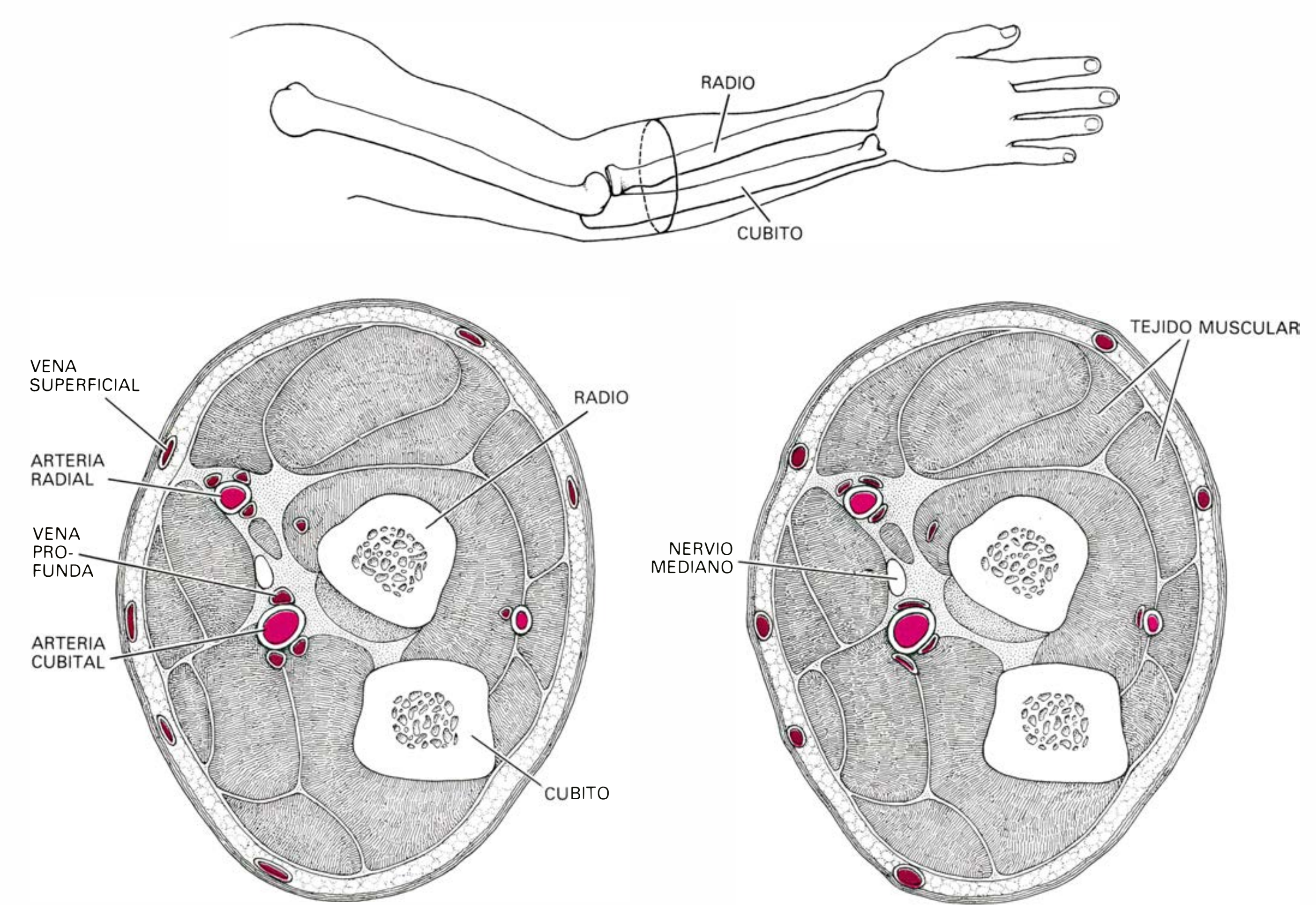
Una propiedad característica de la nariz del camello es, según todos los indicios, responsable de este segundo mecanismo. La superficie interna de la cavidad nasal es higroscópica: absorbe con avidez vapor de agua. Cuando el aire exhalado pasa sobre esta superficie se retiene vapor de agua; en la siguiente inhalación el aire que circula sobre ella, más seco, extrae vapor de agua. Esta extracción de agua contribuye al humedecimiento del aire inhalado y reinstaura al mismo tiempo la condición higroscópica de la superficie. No existe ninguna razón por la que este proceso no pueda operar al unísono con el de intercambio de calor y, de hecho, este parece ser el caso.

Para probar que la superficie higroscópica podía funcionar como regenerador de humedad diseñé un sencillo modelo de laboratorio a través del cual se hacía circular aire en sentidos alternantes y cuyo grado de humedad podía controlarse. Se simulaba así la respiración del camello. El modelo de nariz consistía en una cámara rectangular de 30 centímetros de longitud por siete de anchura. Para representar la separación entre las superficies interiores de la nariz del camello, la base y el techo de la cámara distaban dos milímetros entre sí.

En la nariz del camello el aire circula a través de los turbinales: estructuras que forman conductos delicadamente plegados cuya sección transversal recuerda la de los rollos de pergamino. En los turbinales está la razón de que el área total de la superficie interior abarque más de 1000 centímetros cuadrados. El área de la superficie interior del modelo era aproximadamente la décima parte. Regulamos entonces el volumen de aire que circulaba a través de la cámara durante un determinado período de tiempo, de suerte tal que fuera una décima parte del que circula en el camello. Hicimos pasar aire a través de la cámara durante cinco segundos, en cada sentido. El modelo "respiraba" seis veces por minuto, lo que venía a coincidir con la frecuencia de respiración del camello en estado de reposo.

Revestí la superficie interior de la cámara con diferentes combinaciones salinas, tales como cloruro de calcio, y con otros materiales higroscópicos. Todos se mostraron eficaces; y hasta el propio papel de filtro ordinario demostró ser lo suficientemente higroscópico para probar la validez del modelo. Coloqué una simple hoja de papel de filtro, que medía alrededor de seis por 24 centímetros, en el interior del modelo de nariz. En cada ciclo respiratorio pasaba aire seco en un sentido (representando la inhalación) durante cinco segundos y aire con un 90 por ciento de humedad relativa en sentido contrario durante otros cindo segundos (exhalación). Tras varios minutos de funcionamiento se establecía un estado de equilibrio. El aire exhalado entraba por una parte de la nariz con un 90 por ciento de humedad relativa, saliendo por la otra parte con sólo el cinco por ciento. Recíprocamente, el aire inhalado, que entraba en el modelo de nariz completamente seco, alcanzaba una humedad relativa del 85 por ciento al abandonarlo por el otro extremo.

Que una simple hoja de papel de filtro pueda humedecer y desecar, de forma alternante, el aire que circula por ella demuestra que el mismo principio puede operar en la nariz del camello. Resulta significativo que el camello sólo exhale aire no saturado de agua cuando se le impide beber durante un largo período de tiempo. Bajo estas



DERIVACION ESPACIAL de un sistema de contracorriente que se encuentra en el brazo. Cuando el tiempo es frío (*izquierda*) la sangre que circula por el brazo retorna hacia el cuerpo por venas cuyo curso es adyacente al de las arterias. Por tanto, la sangre venosa recupera parte del calor que pierde la arterial. Cuando hace calor (*derecha*) se obvía el intercambio. La circulación de retorno se desvía entonces hacia venas próximas a la superficie del brazo.

condiciones, las membranas nasales se desecan y quedan recubiertas de una capa de moco seco y de restos de células. Esta capa es higroscópica, capaz de funcionar exactamente como indica nuestro modelo. Aquí encontramos la razón de por qué el camello puede exhalar aire que no esté completamente saturado.

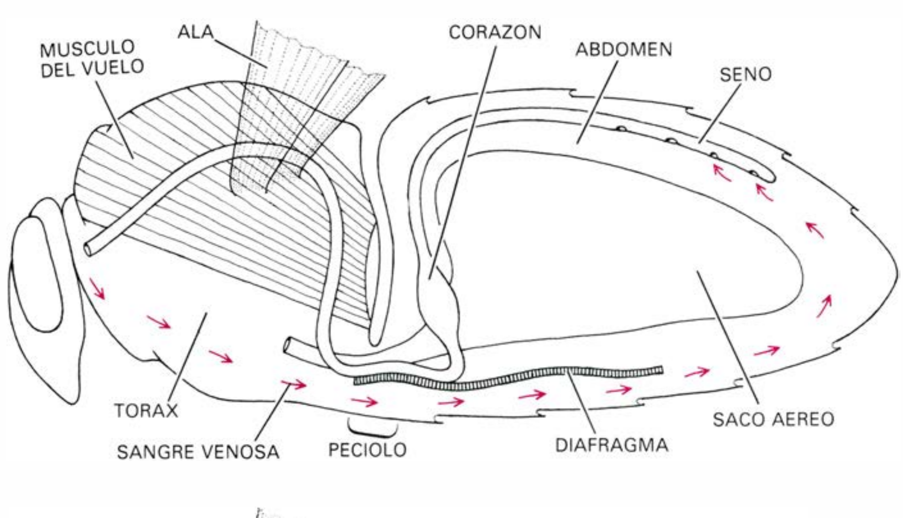
Para evaluar qué cantidad de agua puede ahorrar un camello deshidratado cuando la superficie de su cavidad nasal está seca y es higroscópica, consideremos un período de tiempo durante el cual el animal consuma un litro de oxígeno (en el caso de un ejemplar adulto y en estado de reposo, éste sería de unos dos minutos de duración). Para conseguir esta cantidad de oxígeno, el camello inhalaría un total de 20 litros de aire. Supongamos que la temperatura del aire durante la noche sea de 28 grados C y la humedad relativa del 40 por ciento. Si el aire se exhalara a 35 grados y al 100 por ciento de humedad relativa, el camello perdería 568 miligramos de agua. Si se exhalara a 28 grados y 100 por ciento de humedad relativa (como consecuencia de darse en la nariz únicamente intercambio de calor), el camello perdería 322 miligramos. Si el aire se exhalara a 28 grados y 75 por ciento de humedad relativa (resultado del intercambio de calor y de agua higroscópica), el animal perdería sólo 187 miligramos de agua.

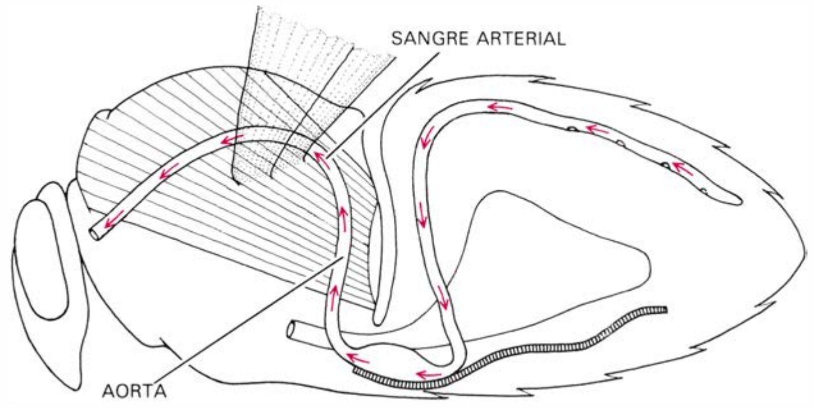
Podemos dar un paso más en la valoración de la economía del agua en el camello. Consideremos que la combinación metabólica de un litro de oxígeno con el hidrógeno contenido en el alimento del camello conduce a la formación de unos 600 miligramos de agua. La pérdida de 187 miligramos significaría, pues, que un camello deshidratado cede en una noche, a través del tracto respiratorio, tan sólo un tercio de la cantidad de agua producida por su metabolismo. Esto no implica necesariamente que durante un recorrido largo el camello pueda ganar agua a partir de sus procesos metabólicos, pues no sólo necesita agua para su respiración, sino también para la formación de orina. Además, se pierde algo de agua con las heces y siempre existe evaporación a través de la piel, incluso cuando, aparentemente, el animal no suda. Asimismo, durante el día, cuando la temperatura es elevada, la evaporación de agua aumenta, tanto a través de la piel como del tracto respiratorio.

Una vez establecido que los materiales higroscópicos pueden ser utilizados por los animales como regeneradores de humedad, se puede constatar que este principio tiene muchas otras aplicaciones, aparte de la descrita en la nariz del camello. Hace muchos años observé que la rata canguro duerme a veces sentada, manteniendo su cabeza recostada entre las patas traseras. En esta posición, la rata respira a través del pelo de sus patas. Me pregunté entonces si ello podría influir sobre su balance hídrico. Sospecho ahora que parte del vapor de agua del aire exhalado debe de ser absorbido por el pelo y desprendido otra vez en el aire inhalado. La medición directa de este proceso resultaría bastante difícil; no obstante, he observado que las ratas canguro amenazadas de deshidratación permanecen más tiempo con la cabeza entre las patas que las que no lo están.

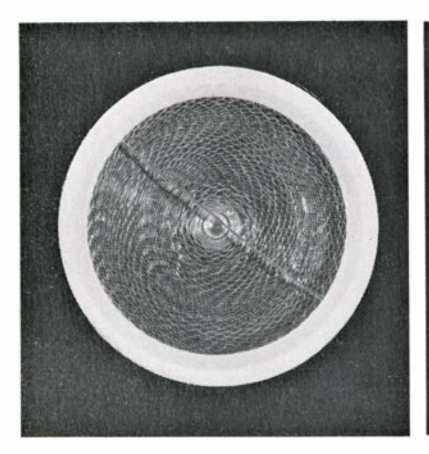
Siempre que un animal respire a través de un material higroscópico, bien sea lana, pelo o plumas, puede recuperarse agua. Sentiel Rommel, del College of the Atlantic, me ha comentado que los ciervos duermen en invierno con la cabeza reclinada sobre sus extremidades posteriores. Esta posición reduce, sin duda, la pérdida de calor a través de la cabeza, que está escasamente aislada. Debe también reducir la pérdida de agua respiratoria. ¿Tiene importancia este ahorro, considerando que la nieve constituye una reserva ilimitada de agua? La respuesta es afirmativa. Si los ciervos sustituyeran el agua perdida ingiriendo nieve habrían de consumir calor para fundir la nieve, calentar el agua hasta la temperatura del cuerpo y, después, vaporizarla.

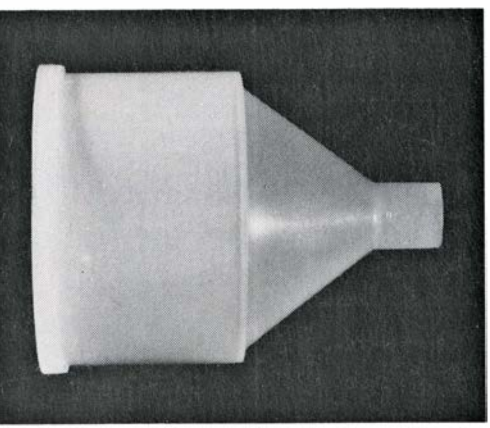
Hagamos un alto y resumamos. Los intercambios de calor por contracorriente en las aletas de las ballenas y en las patas de las aves dependen de la circulación de fluidos en dos conductos separados y adyacentes. Por el contrario, los intercambios nasales de calor en los mamíferos y los intercambios de humedad peculiares del camello se dan en un único conducto, y, en vez de estar separados en el espacio, los flujos contracorriente lo están en el tiempo. Ambos sistemas, los de separación espacial y aquellos otros de separación temporal, aunque totalmente pasivos, dependen del flujo “cuesta abajo” de calor o de humedad.





DERIVACION TEMPORAL de un sistema de contracorriente que se encuentra en el himenóptero *Bombus vosnesenskii*. Si hace calor, esta derivación inactiva el mecanismo de intercambio que devuelve a los músculos del vuelo el calor que producen. Se indica aquí cómo funciona esta derivación. Cuando el insecto inhala (*diagrama superior*), la sangre venosa es impelida hacia el interior del abdomen. Cuando exhala (*diagrama inferior*), la sangre arterial es impulsada hacia los músculos. El proceso reduce la transferencia de calor entre el conducto venoso y la aorta. A Bernd Heinrich, de la Universidad de California en Berkeley, debemos el descubrimiento de este sistema. La ilustración es de T. Prentiss.





DISPOSITIVO ARTIFICIAL DE INTERCAMBIO POR CONTRACORRIENTE; humedece el aire inhalado por pacientes a los que les ha sido practicada una traqueotomía. El dispositivo consiste en un cilindro de plástico conectado a la parte superior del tubo que penetra en la tráquea. En su interior, dos bandas de lámina metálica arrolladas proporcionan una superficie donde puede condensar el agua del aire exhalado. Cuando se inhala, el agua se vuelve a evaporar. Nils Toremalm fue el inventor del aparato.

¿Continúan operando estos sistemas, teniendo en cuenta su carácter pasivo, cuando ya no son necesarios? Podemos imaginar situaciones en las que este funcionamiento ininterrumpido pudiera resultar perjudicial, por ejemplo, en circunstancias en las que convendría que el calor se disipara en vez de conservarse. Sea el caso de una ballena que nade en mares tropicales, no en aguas polares. El calor generado por el metabolismo del animal debe perderse; ahora bien, como la ballena aísla su cuerpo mediante un gruesa capa de grasa, ha de servirse, de vías para la pérdida de calor, de las superficies de las aletas del cuerpo y la cola. El procedimiento más sencillo para acelerar la pérdida de calor a través de las aletas consistiría en aumentar el flujo circulatorio general, de manera que la sangre permaneciera poco tiempo en las zonas de intercambio de calor por contracorriente. Un sistema más eficaz sería aquel que eludiera totalmente, mediante la utilización de derivaciones, el tránsito de la sangre por los sistemas de intercambio.

En la ballena, la sangre puede desviarse de las áreas de intercambio porque algunas de las venas de las aletas discurren muy superficialmente, y no en la vecindad de las arterias, que se localizan en zonas más profundas. Si la sangre circulante se desvía hacia las venas superficiales, cuando retorna hacia el centro del cuerpo ha sido enfriada por el agua del océano. En el hombre encontramos una organización análoga, aunque menos desarrollada. Aquí, las arterias que riegan la parte inferior de los brazos siguen un curso adyacente al de las venas. Cuando el tiempo es frío y conviene conservar el calor, esta disposición sirve para volver a calentar la sangre que regresa hacia el centro del cuerpo. Cuando hace calor, la sangre venosa se desvía hacia venas que transitan lindando la piel y que evitan los sistemas de intercambio de calor, cuyo emplazamiento es profundo.

Podemos imaginar otra manera más de evitar el intercambio de calor entre dos vías adyacentes. En vez de separar el fluido caliente y el frío en el espacio, podría hacerse en el tiempo. En concreto, la circulación podría cesar en uno de los conductos, mientras el otro transporta el flujo de retorno. Bernd Heinrich, de la Universidad de California en Berkeley, ha descubierto un sistema que funciona según este principio. Sirve para regular la temperatura de los músculos del vuelo del himenóptero *Bombus vosnesenskii*.

Los músculos del vuelo del *Bombus* están situados en el tórax, mientras que el corazón se localiza en el abdomen. El tórax y el abdomen se conectan a través de un estrechamiento, el pecíolo, a través del cual discurre la arteria aorta, muy próxima al conducto que porta la sangre venosa de retorno al corazón. El pecíolo constituye, pues, el lugar de emplazamiento del sistema de intercambio de calor por contracorriente. En tiempo frío, este mecanismo devuelve hacia los músculos del vuelo la mayor parte del calor que los mismos generan. Esta recuperación de calor es necesaria porque el insecto no puede volar a menos que la temperatura de los citados músculos supere los 30 grados C. Este dispositivo de intercambio permite mantener los músculos del vuelo a la temperatura necesaria cuando la del aire se acerca a los cero grados.

Cuando el tiempo es caluroso, los músculos de *Bombus* deben perder calor, pero no hay en el pecíolo espacio suficiente para dar cabida a un conducto adicional en derivación que evite el paso por el sistema de intercambio. Heinrich encontró que, en estas condiciones, el flujo de la sangre arterial y venosa podía producirse de forma alternante. Al inhalar, el abdomen del insecto se distiende y la sangre venosa es atraída hacia su interior. Cuando exhala, se comprime el abdomen y la sangre arterial es impulsada hacia el tórax. La compresión aplasta el conducto venoso entre el tórax y el abdomen y la sangre cesa de circular a su través.

Algunas estructuras que recuerdan a los mecanismos de intercambio aquí descritos trabajan "cuesta arriba", esto

LAS CORRIENTES PROXIMAS A LA PLATAFORMA PERUANA constituyen un sistema de contracorriente a gran escala. Una corriente profunda recala en la costa y aporta nutrientes a la superficie, donde sirven de alimento para la pesca costera. Una corriente superficial conduce la materia orgánica alejándola de la costa. Esta materia se hunde y alcanza la corriente profunda, donde se vuelven a albergar los nutrientes. Así, se mantiene su concentración. El proceso depende, en última instancia, de la energía solar.

es, transportan una sustancia en contra de su gradiente de concentración. Estas estructuras se conocen con el nombre de multiplicadores o, de forma más precisa, multiplicadores por contracorriente. En los riñones de un mamífero, un conjunto de multiplicadores por contracorriente es responsable del proceso de concentración de urea y de otras sustancias en la orina. En la vejiga natatoria de los peces, una estructura similar concentra los gases, a pesar de la presión interior de la vejiga.

El aspecto característico de un multiplicador por contracorriente es el de un asa en forma de horquilla. Avanza un fluido por el conducto mientras un mecanismo de transporte activo (un transporte "cuesta arriba" de moléculas que requieren el aporte de energía) transfiere una sustancia disuelta en el fluido desde el brazo de salida hasta el de entrada en el asa. Aun cuando la concentración en el brazo de salida sea sólo ligeramente más baja que en el de entrada, la concentración en el área del asa puede aumentar hasta alcanzar niveles muy elevados.

Aunque no tengo referencias de ningún sistema tecnológico análogo al de los multiplicadores por contracorriente que se encuentran en los animales, existe en la naturaleza un multiplicador que no opera a nivel de un ser vivo, sino a una escala casi global: la corriente oceánica profunda que recala en las costas del Perú y arrastra hacia la superficie agua rica en nutrientes. A la altura de la costa del Perú se encuentra, por consiguiente, una gran concentración de plancton que mantiene la riqueza de la pesca costera. Cuando el agua superficial se aleja de la costa, las partículas de materia orgánica se hunden hacia la corriente subyacente que se dirige hacia la costa. De esta manera, se retienen constantemente nutrientes dentro de este círculo. La fuente de energía que sustenta este sistema de enriquecimiento es la que aporta la corriente. Las corrientes oceánicas son impulsadas por la acción del viento y modificadas por la rotación de la tierra; por tanto, en último extremo, la energía necesaria para mantener el proceso descrito proviene del sol.

Este razonamiento nos ha llevado lejos de la consideración del enigma de cómo el camello disminuye la humedad del aire. Resulta interesante constatar que el mismo principio básico, el del flujo contracorriente, es aplicable en muchas situaciones diferentes, tanto en los sistemas vivos como en los inanimados, tanto en la naturaleza como en la tecnología.

Atomos altamente excitados

Son flojos, frágiles y extensos. Los hay cuyo diámetro mide casi una centésima de milímetro, 100.000 veces más que el de un átomo en su estado de menor energía

Daniel Kleppner, Michael G. Littman y Myron L. Zimmerman

El emblema del modelo planetario del átomo, introducido en 1913 por Niels Bohr, se ha convertido en símbolo de nuestro tiempo. Desde los años 30, cuando escultores y arquitectos modernistas adoptaron el emblema, el diagrama familiar de los electrones girando en torno al núcleo ha venido a significar el conocimiento y el progreso científicos. Quizá la persistencia del omnipresente símbolo refleje su antigüedad: la teoría atómica de Bohr imita en parte la teoría planetaria de Newton y el símbolo podría pasar fácilmente por un plano abstracto del sistema solar. Sea cual sea la razón, la curiosa mezcla de ideas tradicionales y modernas que sustenta la teoría de Bohr le ha dado una vitalidad notoria. El lenguaje y el espíritu del trabajo de Bohr han persistido en el pensamiento físico mucho después de que la comunidad científica (Bohr incluido) reconociera que el modelo había cumplido su finalidad.

La teoría de Bohr del átomo de hidrógeno tuvo una vida científicamente útil de algo más de una década. La creación de la mecánica cuántica, a mediados de los años 20, marcó su fin. Desde hace muy pocos años, sin embargo, en el ámbito de la física atómica se ha ido configurando un nuevo campo en la tierra de nadie que limita, por un lado, con la física clásica del siglo XIX, y, por otro, con la mecánica cuántica del siglo XX, y en la que se forjaron los primeros trabajos de Bohr. Se trata de la física de los átomos donde un electrón se excita hasta un nivel energético excepcionalmente alto. Gran parte del interés del estudio de los átomos altamente excitados reside en la claridad con que dichos átomos ilustran la continuidad del pensamiento entre el mundo de la física clásica y el mundo de la física cuántica.

Los átomos altamente excitados se suelen llamar átomos de Rydberg, en honor del espectroscopista sueco Johannes Rydberg. Cualquier átomo puede convertirse en un átomo de Rydberg llevando su electrón más externo a un nivel energético muy alto. Los átomos de Rydberg gozan de múltiples propiedades exóticas. En primer lugar, son gigantescos: se han detectado algunos cuyo diámetro se acerca a la centésima de milímetro, lo que representa 100.000 veces el diámetro de un átomo en el estado fundamental, o estado de menor energía. Por su magnitud, los átomos de Rydberg pueden contener otros átomos. Poseen, asimismo, una vida notablemente larga. Los átomos excitados normales vuelven a su estado fundamental en menos de una diez millonésima de segundo. En la escala de tiempo de los fenómenos atómicos, los átomos de Rydberg tienen una vida casi perpetua; no es infrecuente la duración de una milésima de segundo o un segundo. Mientras que los átomos ordinarios apenas si se alteran en presencia de un campo eléctrico o magnético, los de Rydberg sufren fuertes distorsiones, llegando incluso a ser arrancados, cuando se les aplica un campo eléctrico relativamente débil, y pueden ser deformados de maneras inesperadas por un campo magnético.

Hace unos seis años se introdujeron nuevas y potentes técnicas experimentales para estudiar los átomos de Rydberg. De estos se ocupan hoy laboratorios de América del Norte, Europa Occidental y la Unión Soviética. En el Instituto de Tecnología de Massachusetts nos hemos interesado particularmente por la estructura de los átomos de Rydberg en campos eléctricos y magnéticos. Nuestros experimentos nos han permitido observar fenómenos atómicos espectaculares no contemplados hasta entonces. Los experimentos han desvelado también ciertos rasgos, nuevos y sorprendentes, de las propiedades que caracterizan a los átomos ordinarios.

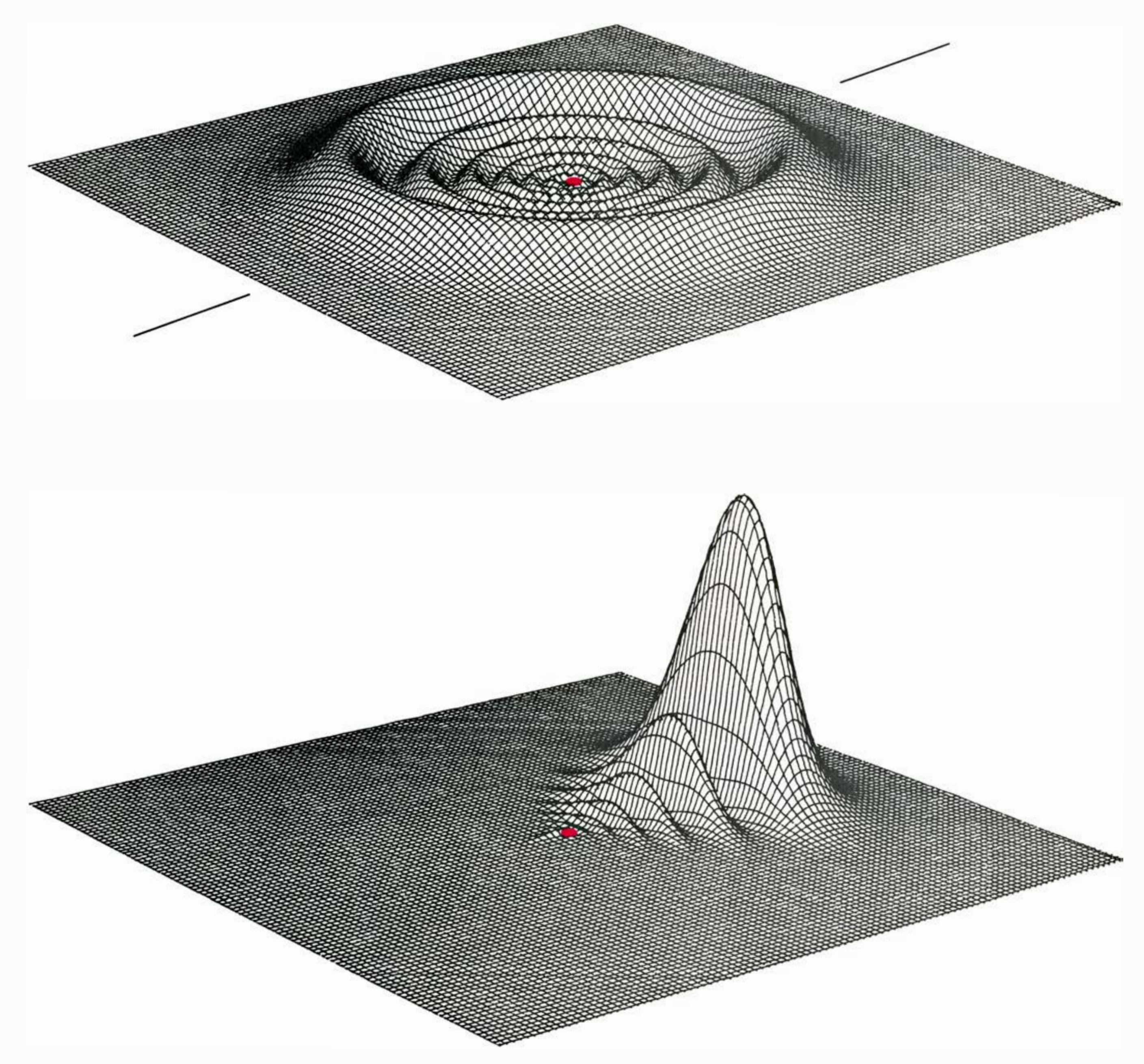
En lo concerniente a sus propiedades fundamentales, los átomos de Rydberg se asemejan al hidrógeno. El parangón surge desde las ideas más elementales en torno a la estructura atómica. Cada átomo consta de un núcleo pesado dotado de una carga eléctrica $+Z$ (la carga total de los Z protones, cada uno de los cuales tiene una carga $+1$) y rodeado de Z electrones, cada uno de los cuales posee una carga -1. Z designa el número atómico del átomo. El hidrógeno, para el que Z es 1, consta de un único electrón, atraído por un núcleo compuesto por un solo protón. Si el electrón más externo de un átomo que no sea el hidrógeno se lleva a un nivel energético muy alto, se coloca en una órbita grande muy por encima de la órbita de los demás electrones. Por tanto, el electrón excitado es atraído por el corazón iónico compacto (formado por el núcleo y todos los electrones internos) cuya carga neta es $+1$, la carga del núcleo del hidrógeno. Mientras el electrón excitado no se acerque demasiado al corazón, el movimiento del electrón es el mismo que tendría en un átomo de hidrógeno. Así pues, la física de los átomos de Rydberg viene a ser esencialmente la física del hidrógeno.

Según la teoría de Bohr, el átomo de hidrógeno es un sistema solar microscópico. La atracción gravitacional, que liga un planeta al Sol, y la electrostática, o fuerza de Coulomb, que liga un electrón a un protón tal dependen de la distancia de la misma manera: ambas fuerzas remiten proporcionalmente cuadrado de la distancia. Por esta razón el movimiento de un electrón en torno a un protón tiene idéntica forma que el movimiento de la tierra alrededor del Sol. A pesar de todo, la analogía entre el movimiento planetario y el movimiento del electrón en un átomo de hidrógeno no es absoluta. De acuerdo con la teoría electromagnética clásica, un electrón que gire perdería rápida-

mente energía radiando luz y acabaría por estrellarse contra el núcleo.

Para salvar esa dificultad Bohr introdujo la idea extraordinaria de que los átomos sólo existían en estados estacionarios, es decir, en ciertos niveles energéticos permitidos. El electrón no podía caer en espiral hacia el núcleo. Sólo podía perder energía "saltando" de un nivel más alto a un nivel más bajo, desprendiendo el exceso de energía en forma de radiación electromagnética, hasta que alcanzara el estado fundamental. A partir de ese nivel mínimo no cabe ya nueva pérdida de energía. Estas simples nociones le permitieron a Bohr explicar la estabilidad del hidrógeno, así como su espectro: el diagrama característico de longitudes de onda bien definidas que el átomo radía.

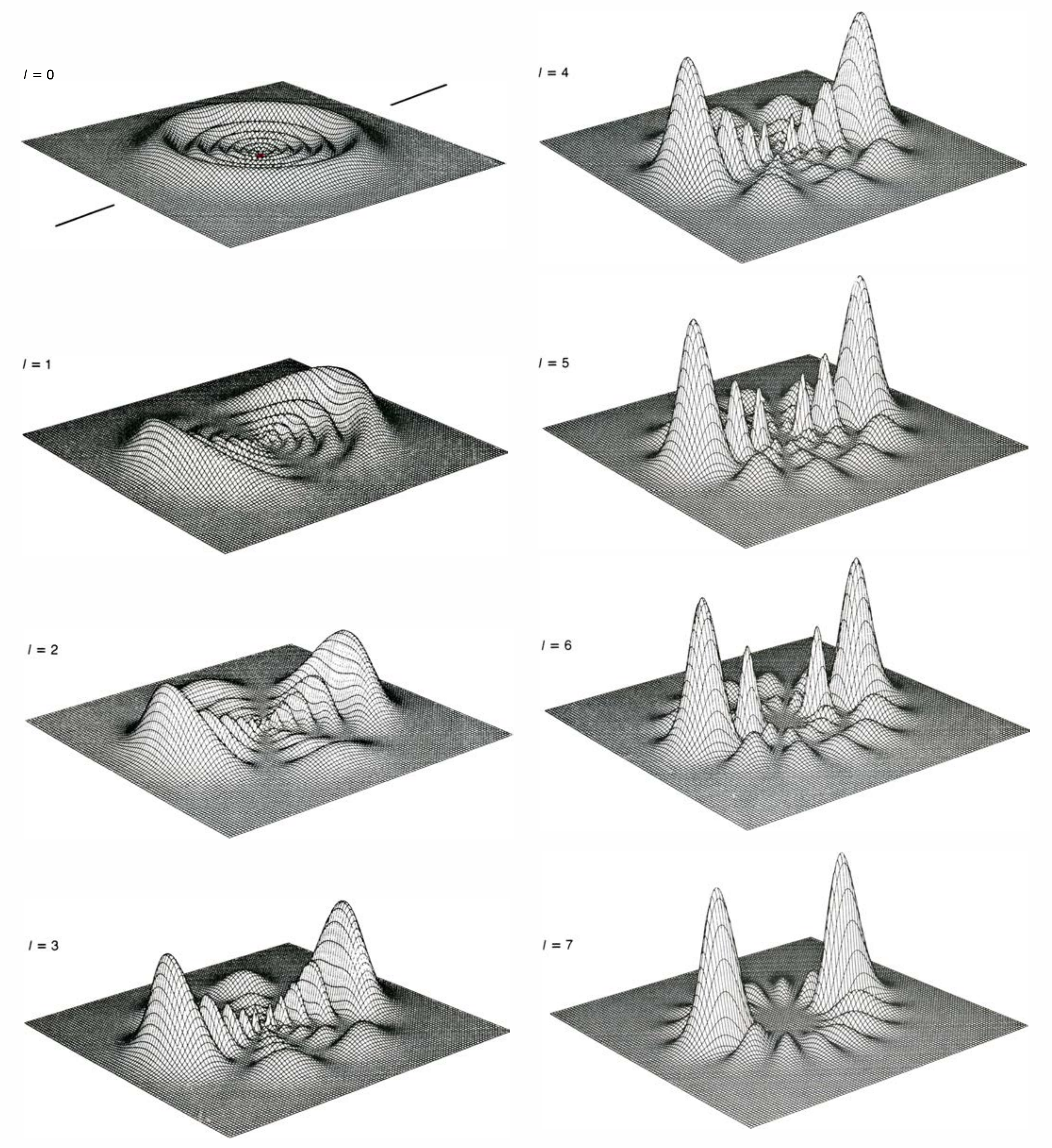
Las energías permitidas del electrón en un átomo de hidrógeno vienen dadas por la expresión $-E_0/n^2$, donde E_0 es una constante y n es un entero positivo, llamado el número cuántico principal, que designa el nivel energético del electrón. La constante E_0 tiene un valor de unos 13,6 electronvolt. (Un electronvolt es la energía que gana un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de un volt.) La energía es negativa porque debe realizarse un trabajo para superar la fuerza



DENSIDAD DE CARGA DEL ELECTRON en el hidrógeno. Se representa sobre un plano que pasa a través del único protón que forma el núcleo del átomo (*color*). Los estados del hidrógeno se describen por los tres números cuánticos n, l y m; n es un entero positivo que designa el nivel de energía del electrón; l es un entero entre 0 y $n-1$, que corresponde a la magnitud de la excentricidad (o momento angular) de la órbita del electrón y m es un entero entre $-l$ y $+l$ que describe la orientación de la órbita. En el estado en que $n = 8$, $l = 0$ y $m = 0$ (*arriba*), la densidad de carga consiste en una serie de picos ondulados concéntricos. En tres dimensiones, la densidad de carga puede imaginarse como una serie de capas esféricas formadas por rotación del gráfico alrededor de un eje que atraviesa el núcleo. La distancia del núcleo al límite del plano corresponde a 2×10^{-6} centímetros, que es 380 veces el radio de Bohr (el radio de un átomo de hidrógeno en el estado fundamental, o estado de menor energía). En un campo eléctrico débil (*gráfico inferior*), el electrón en un estado del hidrógeno de $n = 8$ "permanece" alejado a un lado del protón, formando un dipolo eléctrico. (En este estado, $m = 0$ y el momento angular constituye una mezcla de todos los posibles valores de l desde cero a 7.) Un dipolo eléctrico consta de dos cargas iguales y opuestas separadas por una distancia fija. Muchos átomos actúan como dipolos, pero la mayoría de ellos no son tales: suele tratarse de una ligera distorsión de la nube de carga, y no de una separación de cargas propiamente dicha. En el estado representado, la separación es real. Suele denominarse átomo de Rydberg (en honor del sueco J. Rydberg) a aquel cuyo electrón más externo ha sido excitado hasta un nivel energético alto. Los átomos de Rydberg son verdaderos dipolos.

de Coulomb al separar el electrón del protón. El valor $n = 1$ designa el estado fundamental; así pues, el electrón de un átomo de hidrógeno en el estado fundamental tendrá una energía de $-13{,}6$ electronvolt. La energía se determina combinando la atracción electrostática entre el electrón y el protón y la energía cinética del electrón que gira alrededor del protón. Los niveles de energía más elevados se identifican por valores crecientes de n. Cuando n se aproxima a infinito, la energía se acerca a cero, que es la energía de un electrón y un protón muy alejados y en reposo.

Un átomo de Rydberg es aquel que posee un único electrón en un estado de número cuántico principal alto. Aunque en el espacio exterior los radioastrónomos han detectado átomos en estados de n de hasta 350, en los experimentos de laboratorio n suele hallarse en el intervalo entre 10 y 100. La mayoría de las propiedades interesan-

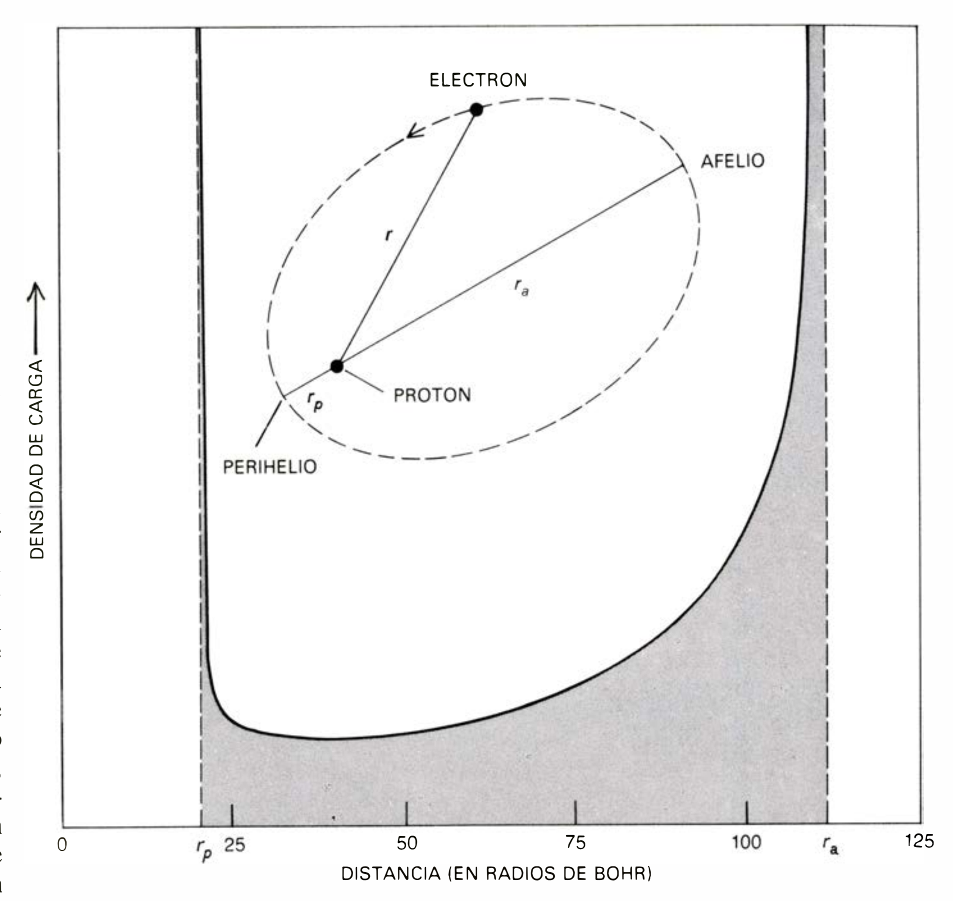


ESTADOS DEL HIDROGENO con $n = 8$ y $m = 0$ varían en momento angular desde $l = 0$ a $l = 7$. Aunque pueda parecernos compleja la densidad de carga, las líneas nodales (donde la densidad de carga es cero) son siempre círculos centrados en el núcleo o líneas rectas que pasan a través del núcleo. En tres dimensiones, las superficies nodales son esferas o conos. Para realizar los gráficos de densidad de carga, William P. Spencer, adscrito al Instituto de Tecnología de Massachusetts, se sirvió de un ordenador. Al objeto de que los gráficos resultaran más fáciles de interpretar, la densidad de carga se multiplicó por r^2, donde r significa la distancia al núcleo. El nodo más interno de la densidad de carga está demasiado cerca del núcleo para que pueda verse.

tes de los átomos de Rydberg dependen de n, y lo hacen de una forma simple. El radio de una órbita de Bohr es proporcional a n^2; el área de la órbita será, pues, proporcional a n^4. La separación entre niveles energéticos adyacentes varía en la proporción $1/n^3$ y el número de niveles energéticos en un pequeño intervalo de energías aumenta en razón de n^5. Las propiedades espectaculares de un átomo de Rydberg se siguen de su dependencia de potencias altas de n. Por ejemplo, cuando n vale 30, el área de la órbita electrónica en un átomo de Rydberg es casi un millón de veces el área de un átomo ordinario.

Al considerar la analogía entre el movimiento de un electrón alrededor de un núcleo y el movimiento de un planeta alrededor del Sol, importa tener presente que la órbita planetaria más general es elíptica. El período de movimiento de un planeta (es decir, la duración del año planetario) depende del diámetro mayor de la elipse, y no de su excentricidad, o forma. Esta ley, que fue formulada por Johannes Kepler a principios del siglo XVII, tiene un paralelo en la dinámica del átomo de Bohr. La energía de un electrón en un nivel dado es la misma para órbitas que tengan el mismo diámetro mayor, sea cual sea la excentricidad.

Puesto que existen infinitas elipses diferentes con el mismo diámetro mayor, puede haber un número infinito de estados atómicos dotados de la misma energía. Bohr arguyó que sólo cabía un número finito de órbitas para cada valor de n. Las órbitas se distinguen geométricamente por su excentricidad. Se llama momento angular del electrón a la variable física correspondiente a la excentricidad; Bohr postuló que el momento angular podía sólo tener valores dados por $lh/2\pi$, donde l es cualquier entero de 0 a n-1 y h es la constante de Planck.



ORBITA DE BOHR CLASICA para el estado de n = 8, l = 5 del hidrógeno; dicho estado no es muy excitado. La órbita forma una elipse achatada (*véase la ilustración interior*). El diámetro de la elipse es 128 veces el radio de Bohr. Cuando el electrón se mueve en su órbita alrededor del protón, el radio orbital r varía entre la distancia del afelio r_a y la distancia del perihelio r_p. La densidad de carga clásica (*gráfico*) es proporcional a la cantidad de tiempo relativa que el electrón pasa a una distancia r del protón. La densidad de carga varía en razón inversa a la velocidad radial del electrón. La densidad de carga clásica diverge en el afelio y en el perihelio, donde la velocidad radial se anula y el electrón invierte su dirección radial.

Al crear su teoría atómica, Bohr usó un argumento original e ingenioso, que recibiría luego la denominación de principio de correspondencia; ese razonamiento le permitió obtener las ecuaciones que gobiernan el átomo de hidrógeno antes de conocer las leyes de la mecánica cuántica subyacentes. La idea de los saltos cuánticos resultaba tan ajena a la física tradicional que no proporcionaba ningún medio de predecir los espectros atómicos a partir de primeros principios. Bohr superó este obstáculo considerando estados altamente excitados del átomo de hidrógeno, o en otras palabras, estados de Rydberg. Argumentó que, si n tenía un valor muy alto, el efecto de cambiar n en una unidad debía ser en cierto sentido pequeño. Por ejemplo, saltar de $n = 100$ a $n = 99$ resultaría mucho menos drástico que hacerlo de $n = 2$ a $n = 1$. Así, los cambios en energía entre dos estados altamente excitados debía ser suave en comparación con el cambio abrupto en energía entre dos estados de poca energía.

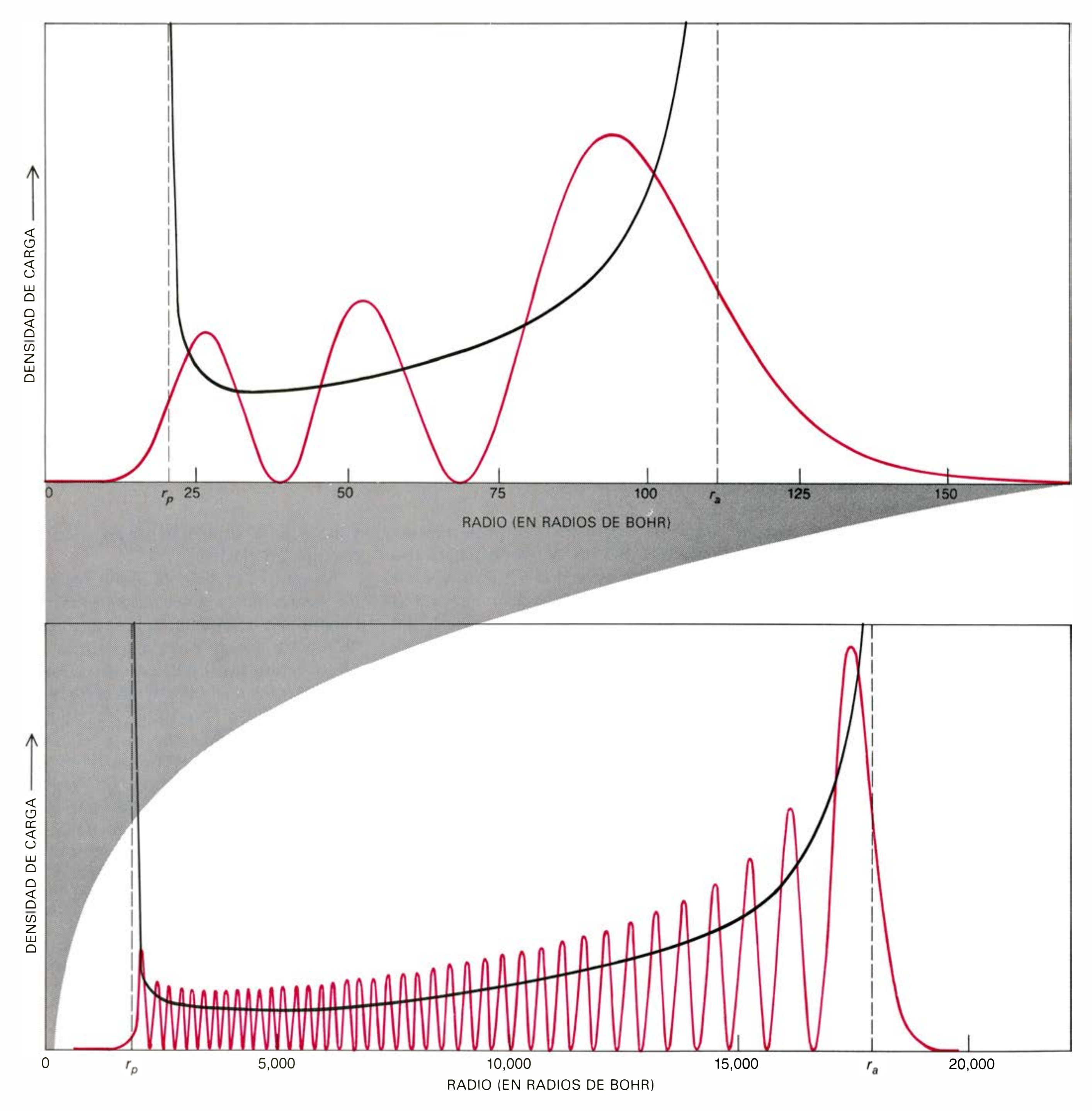
Los cambios suaves caracterizaban los sistemas clásicos, en los que la energía podía variar de un modo continuo. Siguiendo con la analogía, los átomos altamente excitados poseerían propiedades clásicas. En particular, un electrón en un átomo debía emitir radiación electromagnética con una frecuencia igual a la frecuencia orbital. El principio de correspondencia sugería que la frecuencia de la radiación electromagnética emitida cuando un átomo de Rydberg saltaba a un estado próximo debía aproximarse a la frecuencia con que el electrón giraba en torno al protón. Esto fue la clave del problema. Condujo a Bohr a la descripción matemática correcta del espectro del hidrógeno y a la expresión correcta de la energía del electrón.

Aunque el modelo de Bohr explicaba, dentro de su sencillez, las características más conspicuas del espectro del hidrógeno, incorporaba una mezcla tal de conceptos tradicionales e ideas innovadoras que no podía generalizarse o extenderse. Se precisaba un nuevo planteamiento. El enfoque, ajeno a la visión clásica de la teoría de Bohr, lo aportó la mecánica cuántica. La imagen de un electrón como una partícula fue sustituida por una visión abstracta de la teoría de probabilidades. En el nuevo modo de abordar el tema, el electrón se define de manera óptima en términos de una función de ondas: una expresión matemática cuyo valor varía tanto en el espacio como en el tiempo. La probabilidad de encontrar el electrón en un pequeño volumen V es proporcional al producto de V por la intensidad de la función de onda de dicho volumen. La física clásica no necesita hablar de probabilidad. Si se prepara un electrón de un modo determinado en un cierto tiempo, puede predecirse con certeza si

estará en V o no en cualquier momento futuro. En la mecánica cuántica, sin embargo, si se prepara el electrón de la misma manera y repite el experimento muchas veces, unas se encontrará el electrón en V, pero otras no.

Un simple artificio permite describir el electrón sin el engorro de la teoría de probabilidades. Se trata de entenderlo no como una partícula cargada, sino como una nube de carga. Podemos imaginar entonces una carga fraccionaria en un volumen V que sea producto de V por la densidad de carga. Una medición cualquiera de la carga en V habrá de hallar o no un electrón; pero si el electrón se prepara de la misma manera y la medición se repite muchas veces, la media de todos los resultados será la misma que la carga fraccionaria calculada a partir de la densidad de carga. Conocer pues la densidad de carga equivale a saber cuál es la probabilidad de que el electrón esté en V.

Así, de entrada, no parece que la noción de densidad de carga en un átomo tenga mucho que ver con la imagen de Bohr de un electrón orbitando en torno al núcleo. Ambos aspectos, empero, guardan una relación estrecha. Consideremos la probabilidad de dar con un electrón en alguna delgada capa esférica que rodee al núcleo. En mecánica cuántica, la probabilidad sería proporcional al producto del volumen de la capa por la intensidad de la función de ondas en dicho volumen. En física clásica, la densidad de carga media sería proporcional al tiempo que el electrón permanece en la capa. Cuanto más deprisa se mueva el electrón a tra-

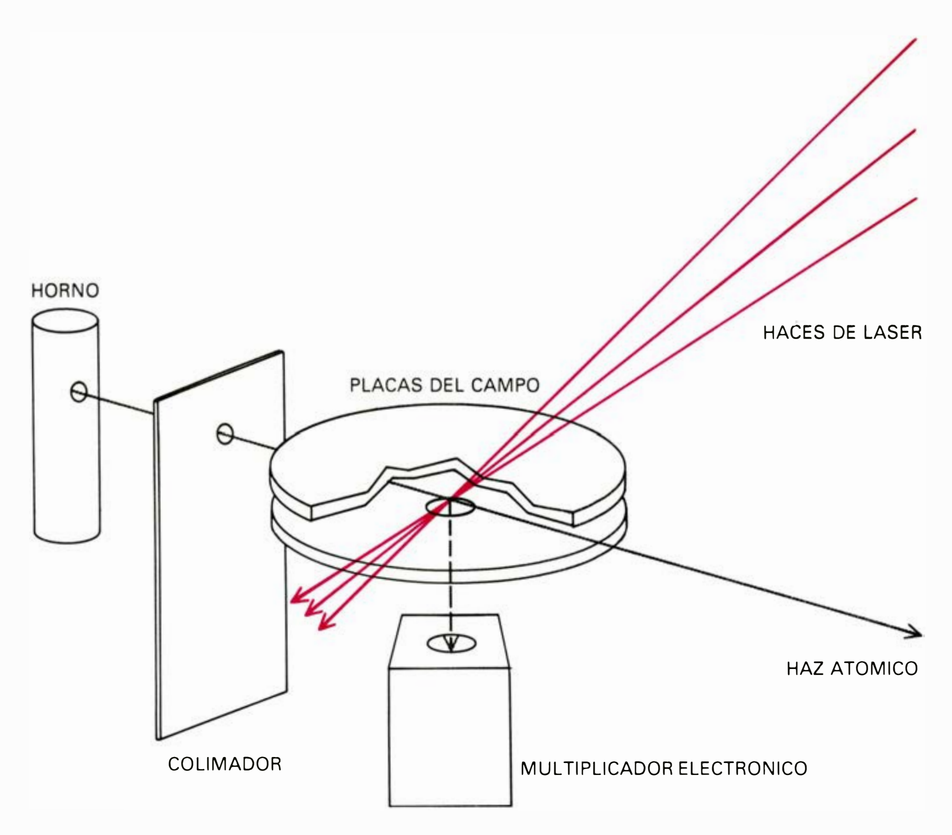


DENSIDAD DE CARGA MECANICO-CUANTICA (*color*). **Difiere de la densidad de carga clásica (*negro*) en un estado de baja energía del hidrógeno tal como el $n = 8$, $l = 5$ (*gráfico superior*). En un estado energético tal como el de $n = 100$, $l = 50$ (*abajo*), las densidades de carga tienen formas similares.**

vés de la capa, menos tiempo permanecerá esa partícula en ella y, por tanto, menor será la carga media en la capa. En resumen, la densidad de carga clásica variará en proporción inversa a la velocidad del electrón.

En una órbita elíptica clásica, la distancia del núcleo al electrón varía entre dos extremos: el afelio y el perihelio, por usar la terminología planetaria. La velocidad radial del electrón se anula cuando invierte la dirección radial en dichos extremos, y así la densidad de carga tiene allí un pico. La densidad de carga alcanza un mínimo donde la velocidad radial es máxima, lo que sucede cerca del perihelio. La densidad de carga se anula a distancias menores que el perihelio o mayores que el afelio, longitudes éstas donde no se halla nunca el electrón.

Las densidades de carga clásica y mecánico-cuántica tienen poco en común en un estado no muy excitado del hidrógeno, como el de $n = 8$, $l = 5$. Pero, de acuerdo con lo que predice el principio de correspondencia, ambas densidades de carga sí se asemejan en un estado altamente excitado, como cuando n vale 100 y l, 60. No obstante, incluso en tales estados advertimos importantes diferencias entre una y otra clase de densidades de carga. La densidad de carga mecánico-cuántica tiene características ondulatorias, nodos y picos redondeados inclusive, que reflejan las propiedades ondulatorias subyacentes del electrón. En la descripción clásica están ausentes las características ondulatorias. Además, en mecánica cuántica, el electrón puede penetrar en regiones del espacio que le son inaccesibles en física clásica. Y así, el electrón puede aventurarse ligeramente más allá de la distancia del afelio.



SE EMPLEAN TRES LASERES PARA EXCITAR LOS ATOMOS de los metales alcalinos (litio, sodio, potasio, rubidio y cesio) a estados de Rydberg en el laboratorio de los autores, en el MIT. El metal se calienta en un horno para convertirlo en vapor. El vapor fluye a través de un pequeño agujero hasta un vacío, donde la densidad es lo suficientemente baja para que un átomo cruce todo el aparato sin chocar. Un colimador convierte el vapor en un haz atómico. Dos o tres pulsos de láser excitan un átomo a un estado de Rydberg. Los átomos de Rydberg se detectan fácilmente mediante la técnica llamada ionización por campo. Se aplica un pulso de alto voltaje entre dos placas centradas en la región de interacción.

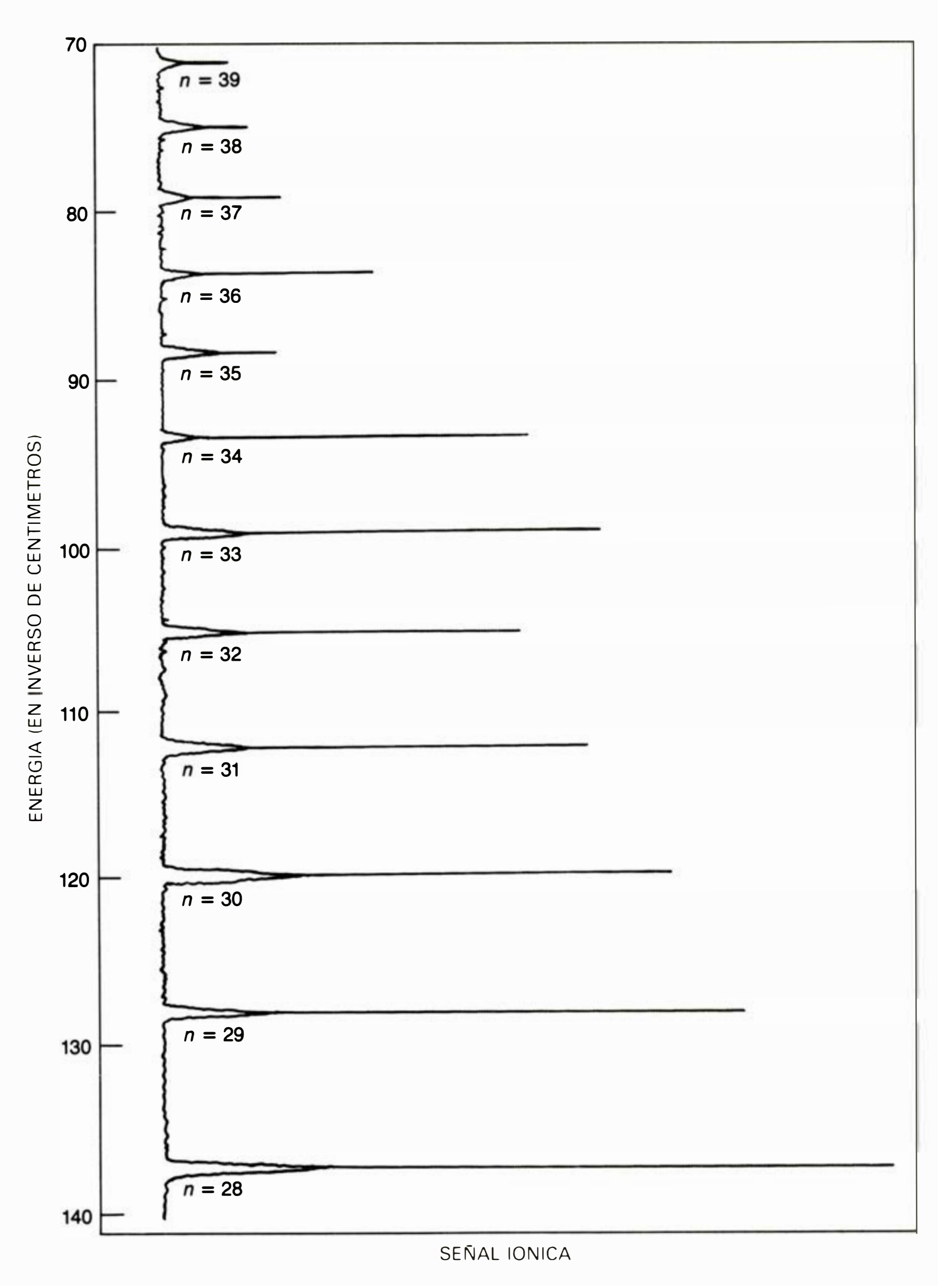
La existencia de átomos de Rydberg se conocía antes de que doblara el siglo. En 1906, R. W. Wood, espectroscopista estadounidense, observó líneas de absorción en sodio gaseoso para transiciones a estados muy altos, de $n = 60$. Por la teoría de Bohr, un átomo puede absorber luz si la frecuencia de ésta multiplicada por la constante de Planck es igual a la diferencia de energía entre el estado inicial del electrón y un estado excitado permitido. Cuando pasamos la luz de una lámpara a través de un gas y la dispersamos con un espectroscopio, aparecen líneas oscuras donde la luz ha sido absorbida en las frecuencias que satisfacen la condición de Bohr. Pero topamos con obstáculos a la hora de estudiar así los átomos de Rydberg. La magnitud de los átomos altamente excitados y el hallarse muy débilmente ligados determinan que se rompan rápidamente cuando chocan en el interior de un gas.

Aislados, los átomos de Rydberg se observaron por primera vez en el espacio interestelar. En 1965, B. Höglund y Peter G. Mezger, del National Radio Astronomy Observatory, detectaron radiación de átomos de hidrógeno que sufrían transiciones entre niveles cercanos a $n = 100$. Para semejantes valores de n, la radiación no corresponde a la región óptica del espectro electromagnético, sino a la región de microondas.

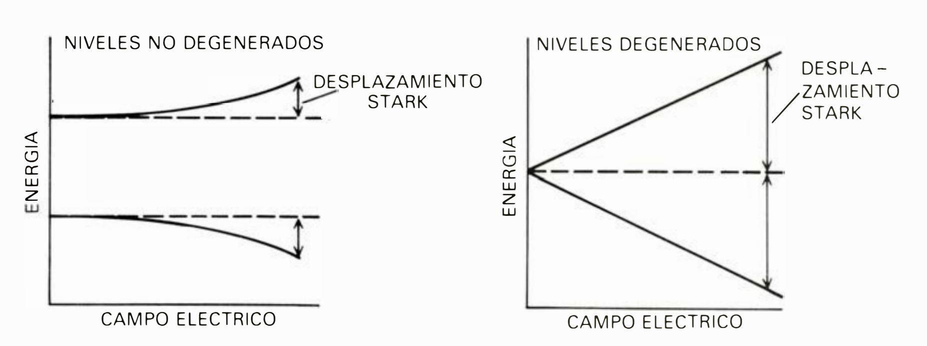
La profundidad del espacio puede parecer un lugar poco apto para encontrar átomos de Rydberg; de hecho es casi ideal, porque la densidad de los átomos es tan baja que resultan raras las colisiones. Desde luego, la densidad no debe ser demasiado baja: deben haber átomos en cantidad suficiente para proporcionar una señal detectable. Un radiotelescopio puede ver tan lejos en el espacio que hay muchos átomos a lo largo de su línea de visión, a pesar de la baja densidad. Cuando electrones libres y protones se recombinan para formar hidrógeno se crean los átomos. Este proceso de recombinación constituye uno de los mecanismos dinámicos que gobiernan el delicado balance entre la materia neutra y las partículas cargadas de la galaxia. Los átomos radían cuando caen en cascada a estados de Rydberg más bajos. Esta radiación de recombinación se emite desde muchas regiones de la galaxia.

Hay varias técnicas a través de las cuales se llega a la creación de átomos de Rydberg en el laboratorio. El bombardeo de un gas con partículas cargadas lleva átomos del gas a un amplio rango de estados excitados, incluyendo los de Rydberg. Otros laboratorios, entre los que se halla el nuestro, siguen una técnica distinta. Se emplea un láser sintonizable para excitar los átomos. Al permitir seleccionar un estado de Rydberg determinado, el método cuenta con una ventaja que ha revolucionado el campo.

La mayoría de experimentos con átomos de Rydberg se han hecho con átomos de metales alcalinos: litio, sodio, potasio, rubidio y cesio. Se suelen elegir estos elementos porque se convierten fácilmente en gas, sus líneas espectrales de absorción están a longitudes de onda convenientemente generadas por la luz del láser y absorben eficiente-



ESTADOS DE RYDBERG DEL LITIO, observables por vía experimental al variar paulatinamente la frecuencia de la luz del último pulso de láser y registrando la corriente del campo ionizante. Cuando la frecuencia corresponde a la energía necesaria para excitar un átomo, éste puede absorber un fotón, o cuanto de luz, y convertirse en un átomo de Rydberg, que se ioniza en seguida. El eje vertical corresponde a la energía, de manera que aparece un pico agudo horizontal en la posición de cada nivel de energía. Las pequeñas irregularidades son consecuencia de las fluctuaciones en la potencia del láser usado. La energía se representa en unidades espectroscópicas, que tienen las dimensiones de inverso de centímetro.



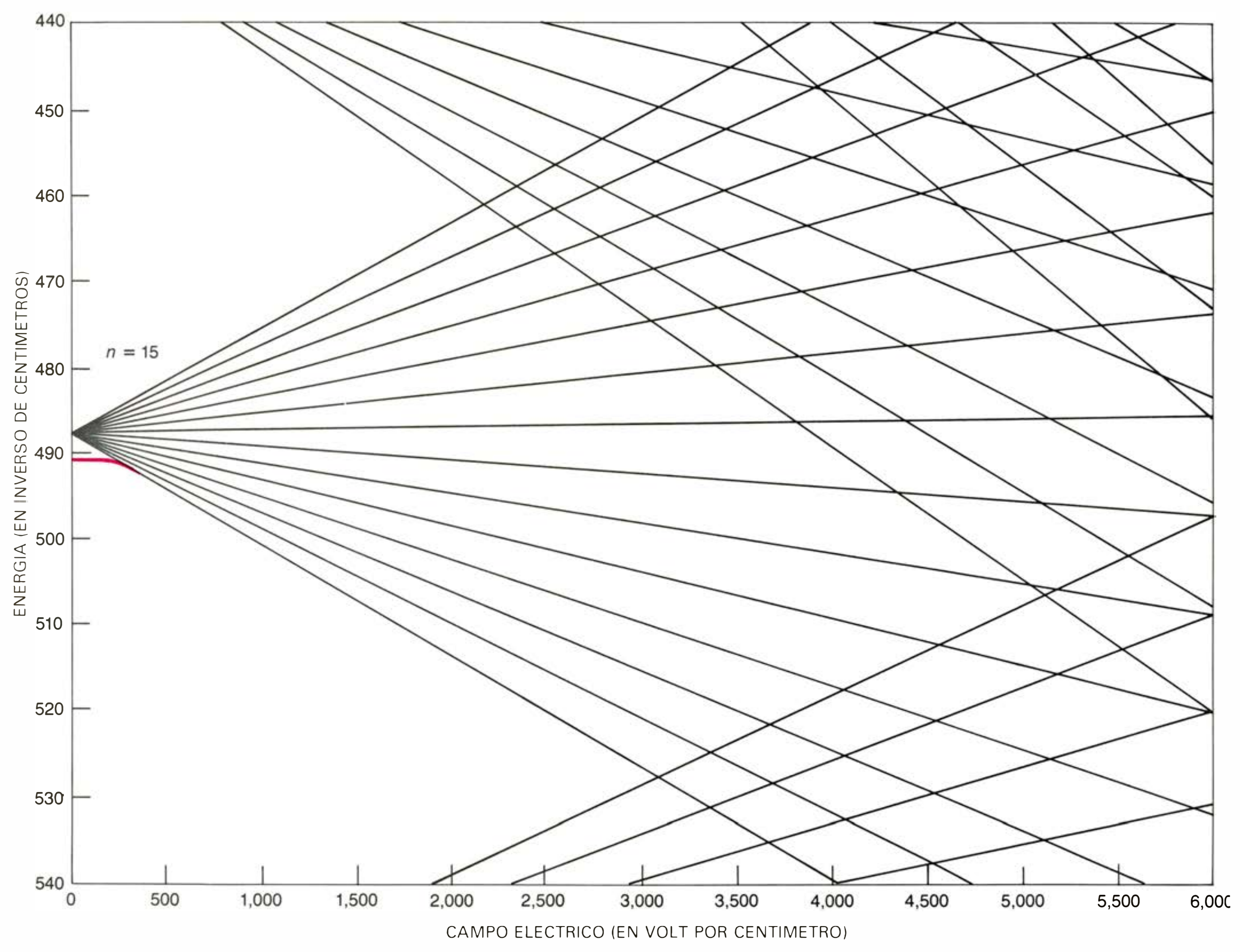
POR EFECTO STARK se entiende el desplazamiento de los niveles de energía de un átomo en un campo eléctrico. El valor del desplazamiento depende de si los niveles energéticos son o no degenerados. Los niveles degenerados son estados con números cuánticos distintos que poseen la misma energía. En estados no degenerados (*izquierda*), el efecto Stark es pequeño y varía con el cuadrado del campo aplicado. Niveles energéticos adyacentes tienden a repelerse entre sí: el nivel superior se desplaza hacia arriba y el nivel inferior hacia abajo. En estados degenerados (*derecha*), el efecto Stark, que es alto, varía de modo lineal con el campo aplicado. Los átomos de Rydberg tienen muchos estados degenerados, con gran efecto Stark.

mente la luz. Los metales alcalinos vienen a ser las bestias de carga de la física atómica.

En nuestro laboratorio excitamos los átomos alcalinos a estados de Rydberg con pulsos de láser sintonizable. Los láseres generan destellos breves e intensos de luz muy monocromática. Normalmente, excitábamos un átomo con pulsos de tres láseres. Los primeros dos pulsos elevaban el electrón a un estado intermedio y el pulso final colocaba al átomo en un estado de Rydberg. En el litio, por ejemplo, dos láseres excitan el electrón al estado $n = 3, l = 0$, y el tercer láser, cuya frecuencia es ajustable en un amplio intervalo, conduce al electrón a un estado de Rydberg con un valor de n muy alto y el de l igual a 1. Los láseres se encienden unas 10 veces por segundo y cada pulso dura unos 5×10^{-9} segundos. La luz brilla tanto que la mayoría de los átomos de la región de interacción (cuyo volumen mide un milímetro cúbico) pueden convertirse en átomos de Rydberg.

Para evitar que los átomos de Rydberg colisionen realizamos los experimentos con un haz atómico. En el caso del litio, el metal se convierte en vapor calentándolo en un horno a una temperatura de unos 650 grados Celsius. El vapor fluye a través de un pequeño agujero a una cámara de vacío; una placa bloqueadora con una pequeña apertura colima el vapor para formar el haz atómico. El vacío es suficientemente bueno como para que un átomo pueda cruzar la cámara sin sufrir colisión.

La detección de átomos eléctricamente neutros suele constituir un problema incómodo, pero no es ese el caso con los de Rydberg. Los ionizamos aplicando un campo eléctrico suficientemente fuerte para arrancar el electrón excitado. Ionizar un átomo en el estado fundamental exige un campo extraordinariamente intenso (en torno a los 300 millones de volt por centímetro); mas para ionizar muchos átomos de Rydberg, basta un campo de sólo unos centenares de volt por centímetro. El campo se genera aplicando un pulso de diferencia de potencial entre dos placas conductoras paralelas y centradas en la región de interacción. El electrón liberado o el ion pasa a través de una rejilla en una de las placas y actúa de detector. La técnica, que se denomina ionización por campo, es tan sensible que podemos experimentar con un átomo de Rydberg por pulso de láser, aunque normalmente detectamos miles de átomos por pulso.



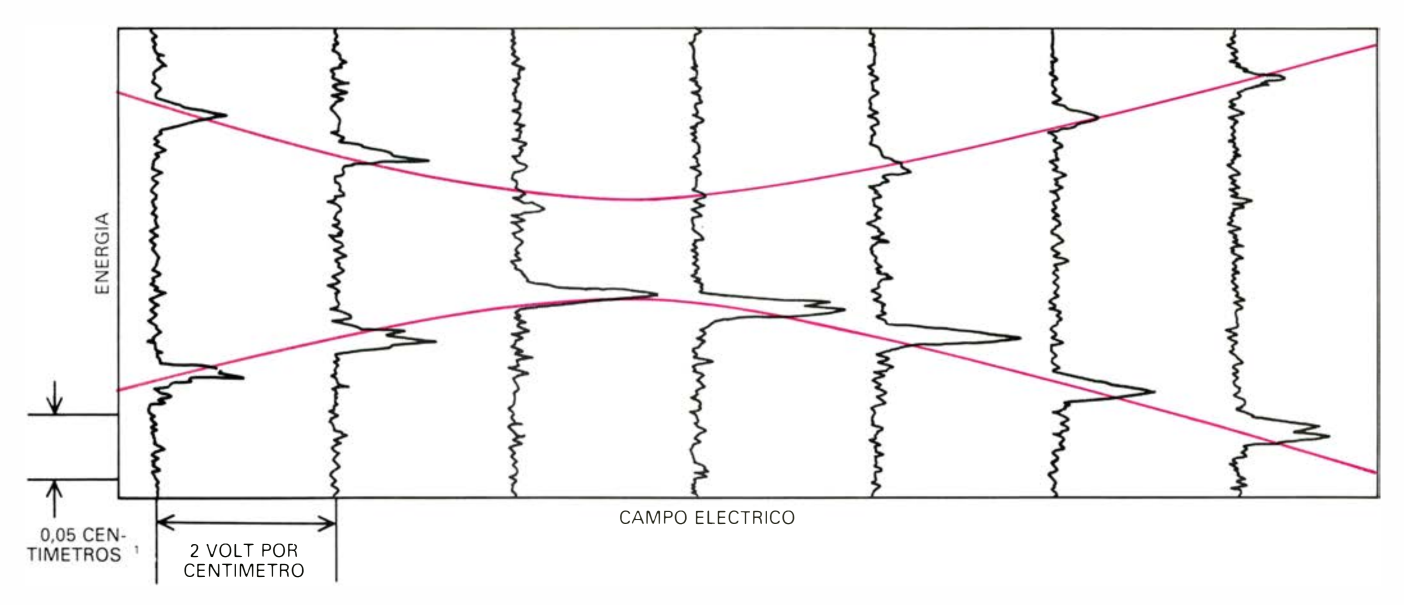
ESQUEMA EN ABANICO que se genera cuando el efecto Stark desdobla los niveles energéticos degenerados de un átomo de Rydberg. Para el hidrógeno se muestra una serie de niveles con $n = 15$, $m = 1$ y una mezcla de valores de l. Además, los niveles con $n = 14$ y $m = 1$ entran en el diagrama por abajo y niveles con $n = 16$ y $m = 1$ entran por arriba. El esquema del efecto Stark para estados comparables del litio recuerda el esquema del hidrógeno, salvo en dos aspectos. Si no hay campo externo, el estado $n = 15$, $l = 1$ del litio es no degenerado, con los otros estados del momento angular de $n = 15$. La causa reside en que la órbita de $l = 1$ se acerca al corazón iónico (los electrones internos y el núcleo). En consecuencia, un electrón con l igual a 1 está sometido a un campo ligeramente más fuerte que en un átomo de hidrógeno. Hablando con exactitud, el estado $l = 1$ no se halla degenerado en un campo débil; no está sometido, pues, a un desplazamiento Stark lineal grande, sino a uno cuadrático pequeño (*color*). En un campo cuya intensidad supere los 300 volt por centímetro, el desplazamiento se torna lineal y el estado $l = 1$ recuerda el estado correspondiente del hidrógeno. La otra diferencia entre los dos esquemas es sutil y significativa. En el esquema del efecto Stark del litio, los niveles de energía nunca se cruzan, lo que sí hacen siempre en el esquema del hidrógeno.

Para obtener una serie de niveles energéticos de átomos de Rydberg, variábamos paulatinamente la frecuencia del tercer láser y registrábamos la corriente del campo ionizante. Siempre que la frecuencia del láser multiplicada por la constante de Planck iguala la energía necesaria para excitar un átomo hasta un estado permitido, algunos átomos se convierten en estados de Rydberg, ionizándose rápidamente. Se consigue así una "imagen" experimental de los niveles de energía.

Hemos empleado estas técnicas en el estudio de un rasgo fascinante de los átomos de Rydberg; sus propiedades en un campo eléctrico. Si se aplica un campo eléctrico a un átomo ordinario, sus niveles energéticos se desplazan ligeramente; el desplazamiento constituye el efecto Stark. La cantidad que se desplaza un nivel dado depende, principalmente, de la proximidad de un nivel vecino. La naturaleza del desplazamiento se altera bruscamente si los niveles energéticos están degenerados. Se dice que dos estados se hallan degenerados cuando, siendo físicamente distintos (es decir, si tienen diferentes números cuánticos), poseen no obstante la misma energía. En estados no degenerados el efecto Stark es pequeño y varía cuadráticamente, o como el cuadrado del campo eléctrico aplicado. En estados degenerados, el efecto Stark es grande y varía de una forma lineal, o por simple proporcionalidad, con el campo. Los átomos de Rydberg son muy degenerados y pueden mostrar unos efectos Stark espectaculares.

La degeneración de los estados de Rydberg es consecuencia de una propiedad exclusiva del hidrógeno: para un número cuántico principal determinado todos los estados de momento angular diferente tienen la misma energía (dada por $-E_0/n^2$). Los estados del hidrógeno también se hallan degenerados con respecto a otro número cuántico, *m*, que describe cómo está orientado en el espacio el momento angular. El valor de *m* puede ser cualquier entero desde $-l$ a $+l$. Así pues, el estado de un átomo de hidrógeno se especifica por los tres números cuánticos *n*, *l* y *m*. (Para describir el spin del electrón y el spin del núcleo se necesitan otros números cuánticos, que podemos despreciar aquí.) En el hidrógeno, para cada valor de *n*, los estados con todos los posibles valores de *l* y *m* son degenerados.

Los estados de Rydberg del hidróge-



EVITACION DEL CRUZAMIENTO en el esquema del efecto Stark del átomo de litio; se muestra en una imagen de alta resolución del gran acercamiento de un nivel de $n = 18$ y de un nivel de $n = 19$. Las dos líneas de color representan cálculos teóricos de los niveles energéticos desplazados por efecto Stark.

no y muchos estados de Rydberg de otros átomos tienen efectos Stark gigantescos, a causa del alto grado de degeneración y del gran tamaño de los átomos. Bajo la acción de un campo eléctrico, los niveles degenerados para cada valor de m se desdoblan en una serie de grupos, cada uno de los cuales tiene cierto valor de m. Si se representa la energía del grupo en función del campo eléctrico, los niveles forman un manojo en el que algunos niveles aumentan con el campo y otros disminuyen.

Un átomo de Rydberg de un metal alcalino como el litio, tiene un efecto Stark que se asemeja al del hidrógeno, aunque presenta ciertas diferencias. Entre los niveles de $m = 1$, por ejemplo, los estados en que l es mayor que 1 se parecen a los estados del hidrógeno: son degenerados y tienen un efecto Stark lineal. Sin embargo, un electrón en el estado $l = 1$ pasa tan cerca del corazón del átomo que la energía del electrón se reduce ligeramente. En consecuencia, el estado $l = 1$ es no degenerado y tiene un típico efecto Stark cuadrático para campos bajos. Para campos más intensos, el desplazamiento se hace lineal y todo el sistema recuerda al hidrógeno.

Hemos estudiado el efecto Stark en átomos de Rydberg aplicando una diferencia de potencial estacionaria a través de las placas centradas en la región de interacción. De nuevo variábamos paulatinamente la frecuencia del láser y detectábamos los átomos excitados ionizándolos con un pulso de alto voltaje, uno o dos microsegundos después de que se apagaran los láseres. Se registraba el diagrama de niveles de energía y se repetía el proceso para valores crecientes del campo aplicado. El mapa de los niveles energéticos desplazados que se obtenía a partir de los datos parecía el mapa que construíamos a partir de los métodos teóricos de la mecánica cuántica [*véase la ilustración de la página siguiente*].

Entre la estructura de Stark del hidrógeno y la del litio media una sutil e importante diferencia. Cuando el campo eléctrico aplicado aumenta, los niveles energéticos del hidrógeno se cruzan entre sí. Para un valor del campo en el que dos niveles se cruzan, estos son degenerados. Debe recalcarse que las degeneraciones no constituyen la regla de la mecánica cuántica, sino la excepción. Cuando topamos con una degeneración es señal de que existe alguna simetría, o simplicidad, subyacente al problema. Así, la degeneración en el hidrógeno de todos los estados del momento angular de un n dado síguese de la forma del inverso del cuadrado de la fuerza de Coulomb.

En el movimiento planetario observamos una simetría análoga que tiene que ver con que la órbita de un planeta sea una elipse cuya orientación esté fija en el espacio. Ahora bien, si la forma del cuadrado inverso de la fuerza gravitacional se perturba, aunque sea levemente, la orientación ya no es constante; la elipse precesa ligeramente, o cambia su dirección en el espacio. La precesión del perihelio del Mercurio es un ejemplo famoso causado en parte por pequeños efectos relativistas.

Si se perturba ligeramente el campo de Coulomb se pierde la simetría subyacente de la estructura Stark. Esto es lo que sucede en el litio. Cerca del corazón iónico del litio (o de cualquier otro átomo que no sea el hidrógeno), la ley del inverso del cuadrado no se mantiene exactamente debido a la influencia de los electrones del corazón. Las consecuencias son drásticas: cuando los niveles se desplazan por efecto Stark, ninguno se cruza. Dos niveles pueden acercarse, pero en algún punto se repelen entre sí y se alejan. Observando la evitación de tales cruzamientos, podemos obtener una prueba sensible de la aproximación de nuestros cálculos. Y, también, podemos usar los datos para desvelar la presencia o ausencia de una simetría subyacente del sistema.

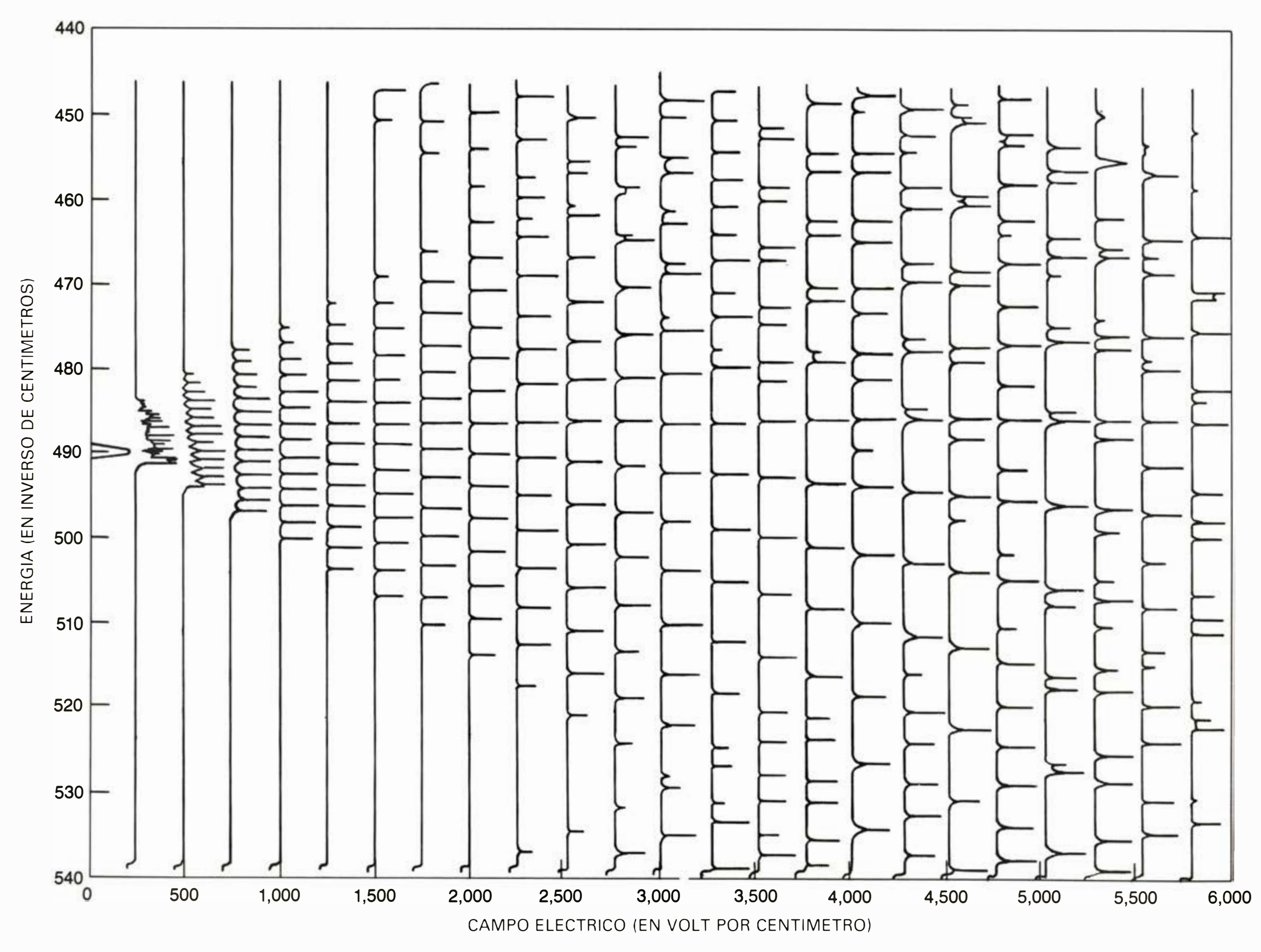
Aunque pueda parecer complejo, el mapa de niveles energéticos de la estructura Stark ilustra una idea muy sencilla sobre la distribución de la carga eléctrica en un átomo de Rydberg. Lo que más sorprende del mapa es la variación lineal de la energía con el campo. Tal variación es peculiar de un dipolo eléctrico: una configuración de dos cargas iguales y opuestas separadas por una distancia fija. Aunque muchos sistemas atómicos y moleculares presentan las características de un dipolo, la mayoría de tales sistemas no forman verdaderos dipolos: no hay auténtica separación de las cargas, sino sólo una ligera distorsión en la forma de la nube de carga. Por contra, en los átomos de Rydberg, la separación de las cargas es bastante real.

La ionización por campo se emplea a menudo para detectar átomos de Ryd-

berg porque es sencilla, eficiente y esencialmente libre de ruido. El proceso físico en que se basa la ionización por campo encierra su propio interés. Se trata del proceso del efecto túnel, que es puramente mecánico cuántico; no hay nada parecido en la mecánica clásica. El efecto túnel es el movimiento de una partícula a través de una región donde la mecánica clásica no le permitiría estar [*véase la ilustración de dos páginas más adelante*].

En ambas mecánicas, la cuántica y la clásica, la energía total de una partícula tiene dos componentes: la energía cinética y la energía potencial. En un átomo de hidrógeno dichas componentes pueden representarse en un gráfico que muestre la energía del electrón en función de su distancia al núcleo. Puesto que la energía total, $-E_0/n^2$, es constante para un valor de n dado, se representará como una línea horizontal. La energía potencial varía inversamente con la distancia y forma una hipérbola. Donde se cortan las curvas que representan la energía total y la energía potencial, la energía cinética es necesariamente nula, de manera que la velocidad del electrón es también cero. Un electrón que se aleje del protón se para allí, y empieza de nuevo entonces a caer hacia el protón bajo la atracción de la fuerza de Coulomb. La intersección se denomina punto de retroceso. De acuerdo con la física clásica, el electrón no puede traspasar el punto de retroceso, porque más allá la energía cinética sería negativa. (La energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad. En la física clásica nunca puede ser negativa.)

El diagrama de energía sufre cierta modificación cuando se coloca un átomo de hidrógeno en un campo eléctrico. Cerca del origen, la fuerza que actúa sobre el electrón procede esencialmente de la influencia del protón; mas, a grandes distancias, donde la fuerza de Coulomb es pequeña, domina la fuerza asociada con el campo aplicado. La curva de la energía potencial, que viene determinada tanto por la fuerza de Coulomb como por el campo aplicado, tiene un máximo allí donde ambas fuerzas se equilibran. Si la energía total es menor que el máximo, la curva de la energía potencial formará una barrera al movimiento del electrón. La línea horizontal que representa la energía total encuentra la curva de la energía potencial en un punto de retroceso interno y en otro externo. En el punto de retroceso externo, un electrón en reposo empezaría a moverse radialmente hacia afuera, acelerándose por el campo aplicado. En la física clásica, un electrón que estuviera entre el protón y el punto de retroceso interno se hallaría atrapado para siempre por la barrera de potencial; no podría esca-

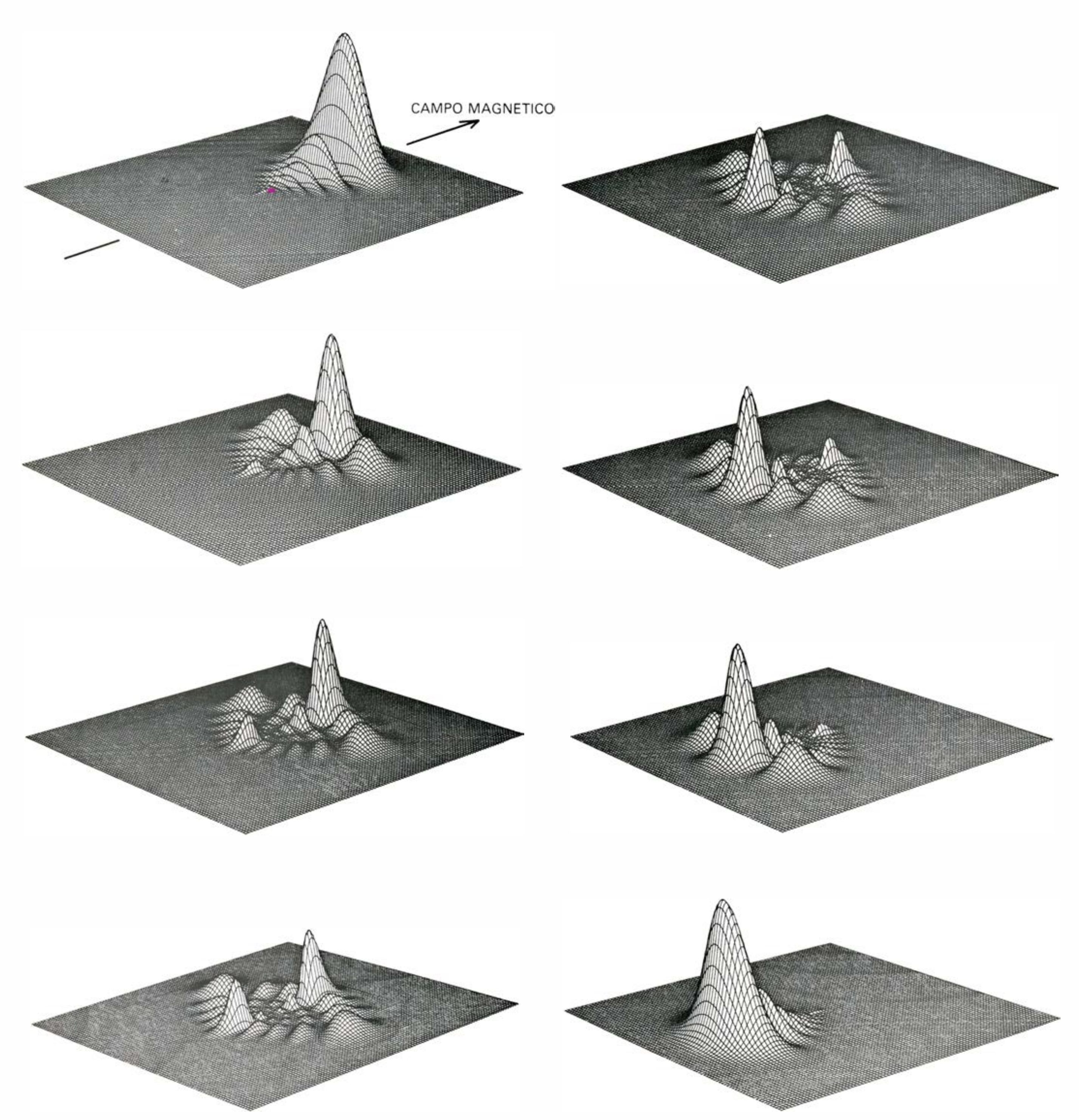


ESQUEMA DEL EFECTO STARK DEL LITIO obtenido registrando la señal del campo de ionización cuando el campo eléctrico aumenta en intensidad. Los picos horizontales indican las señales iónicas que se generan cuando la frecuencia del pulso del láser final, que se varía lentamente, coincide con un nivel energético del átomo. Los niveles energéticos (es decir, las líneas rectas a lo largo de las cuales están los picos horizontales) pueden verse girando la página de lado y mirando a lo largo de la superficie. Los niveles energéticos son los mismos que los de la ilustración precedente del esquema en abanico.

parse a menos que su energía se elevara hasta un nivel más alto que la cima de la barrera.

Cuando se superpone la distribución de carga mecánico-cuántica al diagrama de energía, la "cola" de la distribución se extiende más allá del punto de retroceso externo, lo que indica que el electrón puede escapar del átomo. El estado mecánico-cuántico pierde su carácter estacionario; antes o después, el electrón atravesará la barrera y será arrastrado por el campo aplicado.

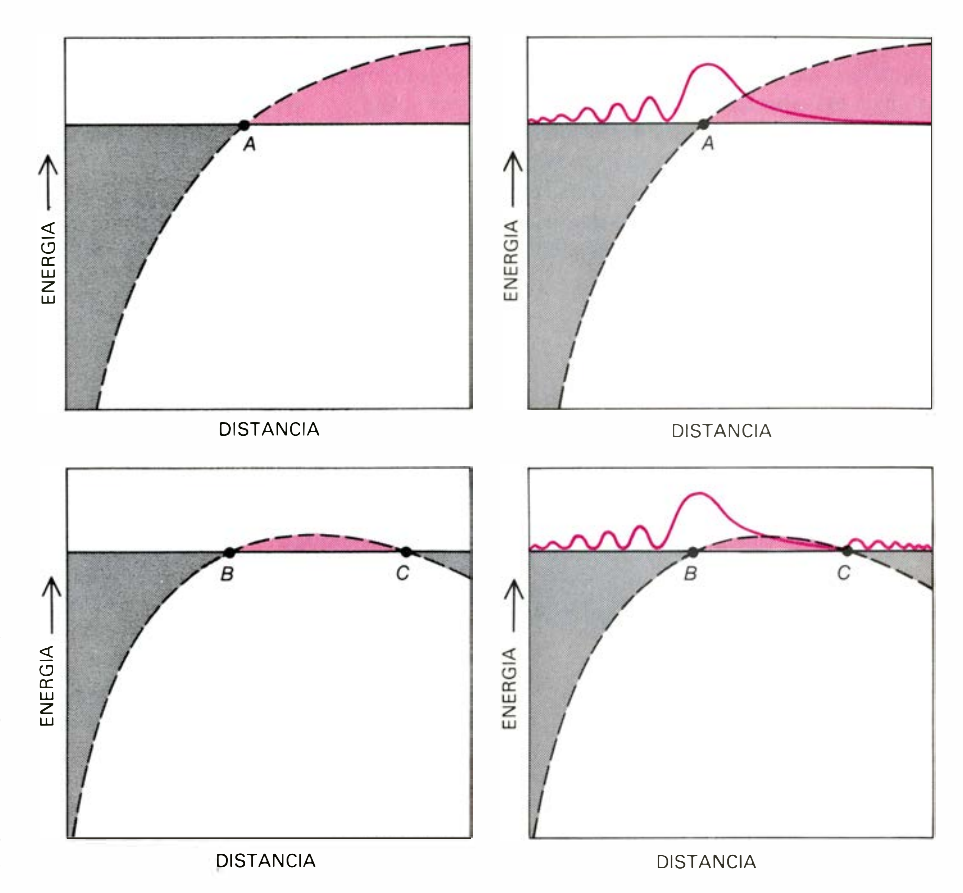
El efecto túnel constituye el mecanismo fundamental de la ionización por campo. También gobierna fenómenos físicos que van desde la desintegración radiactiva de los núcleos a la emisión de electrones por el extremo de un conductor puntiagudo. La vida media del electrón (el tiempo medio de que dispone para atravesar la barrera) varía con la altura de la barrera de potencial; y ello, de una manera espectacular. En el caso de la emisión de partículas alfa por un núcleo, la vida media varía desde microsegundos hasta miles de millo-



ATOMO DE HIDROGENO en un campo eléctrico. Debido a su alto grado de degeneración, puede tomar muchas formas. La distribución de carga para los estados de $n = 8$, $m = 0$ puede tener cualquier de las ocho formas que se indican. En cada estado, el momento angular es una mezcla de valores desde $l = 0$ a $l = 7$. La forma específica que toma un átomo de Rydberg depende de las condiciones experimentales en las que ha surgido. La misma familia de estados se muestra en una ilustración precedente. La nube de carga electrónica se aleja del protón dando lugar a un efecto Stark lineal. El efecto Stark es proporcional a la distancia media entre el electrón y el protón, que difiere para cada estado. En tres dimensiones, la distribución de carga tiene una simetría cilíndrica alrededor del eje coloreado (*véase el primer esquema, arriba a la izquierda*); las superficies nodales son paraboloides de revolución.

nes de años, según la energía de la partícula alfa. En la ionización por campo de un átomo de Rydberg, la vida media decrece típicamente en un factor de un millón cuando se aumenta el campo en tan sólo un 20 por ciento.

El átomo de Rydberg es un sistema ideal para estudiar el efecto túnel porque las vidas medias pueden calcularse con precisión y pueden variarse con nada más que girar el botón que controla el potencial aplicado. En nuestro laboratorio hemos medido las vidas medias de estados de Rydberg del sodio. La idea del experimento es sencilla. Se forma un átomo de Rydberg en el campo aplicado mediante un corto pulso de un láser y se mide el tiempo que tarda en aparecer el ion con un medidor de tiempos electrónico. La medida se repite miles de veces y se calcula la vida media promediada. Para evitar confusiones sólo se observa un átomo en cada pulso del láser. (Como hemos dicho antes, los experimentos de un único átomo son bastante prácticos.) Nuestros resultados están en buen acuerdo con las predicciones teóricas. Hemos encontrado que las vidas medias medidas son tan sensibles a los cambios de la intensidad del campo que pueden emplearse para determinar el campo con un alto grado de precisión.



EFECTO TUNEL de un electrón a través de una barrera de energía potencial. Se trata del mecanismo mecánico-cuántico en que se basa la ionización por campo. En la parte superior izquierda, hay un gráfico de la energía total (*trazo continuo*) y la energía potencial (*trazo discontinuo*) del electrón en un átomo de hidrógeno. La energía se representa en función de la distancia del electrón al núcleo. La energía cinética (diferencia entre energía total y energía potencial) no puede nunca ser negativa en la mecánica clásica, de manera que el electrón está confinado en la región (*gris*) entre el protón y el punto de retroceso (*A*), donde la energía potencial es igual a la energía total. Según la física clásica, un electrón que se alejase del protón se pasaría en el punto de retroceso, para volver entonces a caer hacia el protón; el electrón no puede pasar a la región ulterior al punto de retroceso (*color*). En la parte superior derecha, la densidad de carga mecánico-cuántica se superpone al diagrama de energía. La distribución de carga tiene una "cola" que se extiende más allá del punto de retroceso; hay, pues, una probabilidad finita de encontrar el electrón en la región clásicamente prohibida. Abajo, se muestra el diagrama de energía de un átomo de hidrógeno en un campo eléctrico. La curva de energía potencial se determina por el campo de fuerzas de Coulomb y el campo eléctrico aplicado; fruto de ello, aparecen dos puntos de retroceso (*B*, *C*). En la parte inferior izquierda, se presenta la situación de la física clásica. Un electrón no puede ir de la región comprendida entre el protón y el punto de retroceso interno (*B*) a la región más allá del punto de retroceso externo (*C*), porque tendría que atravesar la región prohibida (*color*). El electrón está ligado al protón. La densidad de carga mecánico-cuántica de la parte inferior derecha muestra que la cola de la distribución de carga trasciende, en su prolongación, el punto de retroceso externo. El electrón puede atravesar la barrera de potencial y escapar del átomo. Tal sucede cuando un átomo se ioniza por medio de un campo eléctrico.

A diferencia de lo que acontece con los átomos en campos eléctricos fuertes, no se conoce bien el comportamiento de los átomos en campos magnéticos intensos. Resulta paradójico que un problema tan elemental de la física atómica permanezca sin resolver. En el caso del hidrógeno, el sistema físico (un electrón, un protón y un campo magnético) no encierra mayor complicación y las ecuaciones que describe el sistema son sencillas. Sin embargo, no se han desarrollado todavía métodos generales para resolver las ecuaciones y buena parte de la física sigue envuelta en el misterio. Un misterio cuya revelación merece algún esfuerzo, porque, con toda seguridad, conducirá al descubrimiento de nuevos fenómenos de interés.

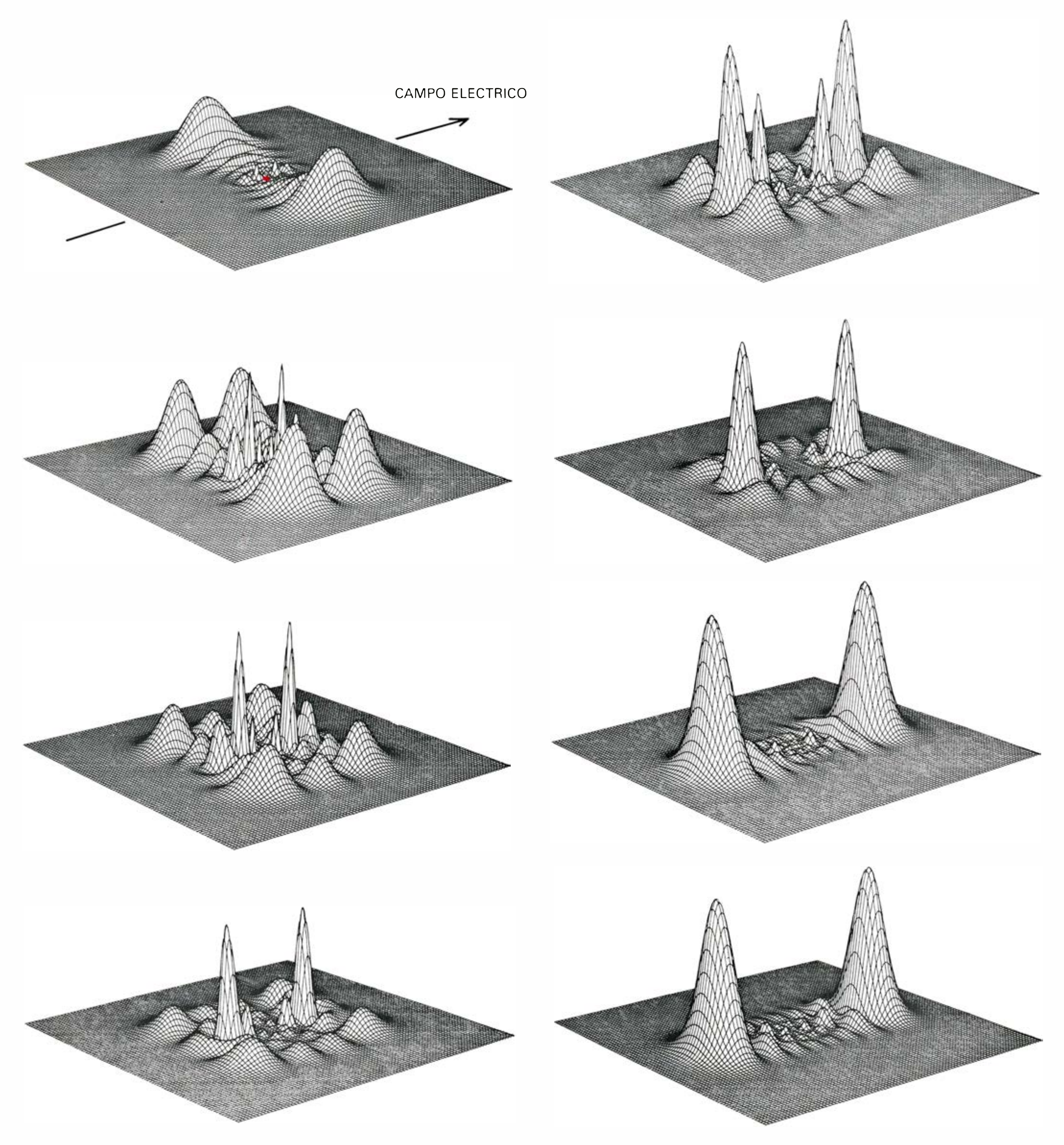
Un campo eléctrico tiende a separar el átomo; cuando el campo supera una intensidad crítica, el átomo se ioniza. Por contra, un campo magnético deforma el átomo, que permanecerá estable aun cuando el campo aplicado sea arbitrariamente fuerte. La fuerza magnética puede llegar a rebasar la fuerza de Coulomb y, entonces, la nube de carga del electrón toma una nueva forma. Los átomos sometidos a estas condiciones suelen reconocerse por átomos magnéticos.

Los átomos magnéticos constituyen un tema de estudio muy atractivo por su peculiar estructura, muy distinta de la de los átomos ordinarios. Que no se hayan estudiado en detalle obedece principalmente a que el campo magnético necesario para convertir un átomo en el estado fundamental en un átomo magnético es más de 1000 veces más fuerte que el campo más intenso que pueda crearse en el laboratorio. A pesar de todo, el tema ha despertado un notable interés entre los físicos.

Se descubrió, hace unos años, que cuando un ente en estado sólido análogo a lo que es un átomo de hidrógeno, lo que se llama un excitón, se ponía en un campo magnético, presentaba propiedades de un átomo magnético. (Los excitones se observan en los semiconductores, donde la carga la portan los electrones y los "huecos", las vacantes cargadas positivamente formadas por la ausencia de un electrón. Un excitón consta de un solo electrón y un solo hueco ligados por la fuerza de Coulomb. Resulta significativo que un excitón sea un átomo excepcionalmente grande.) En fecha más cercana, los astrofísicos observaron que las estrellas de neutrones (estrellas cuya densidad es tal que los electrones de sus átomos se han aplastado sobre los protones, neutralizando su carga eléctrica) pue-

den tener un campo magnético hasta 10 millones de veces más fuerte que el campo más intenso que el hombre puede crear. Estos descubrimientos han estimulado mucha investigación teórica sobre la estructura de los átomos magnéticos. En cambio, es bastante escasa la información espectroscópica obtenida a partir de los excitones o de los objetos estelares con campos magnéticos intensos; así pues, queda todavía por comprobar por vía experimental gran parte de la teoría.

En los últimos años se han formado átomos magnéticos en el laboratorio, aplicando un campo magnético moderado a átomos de Rydberg. Para entender las propiedades de los átomos de Rydberg en campos magnéticos conviene contemplar el magnetismo atómico desde la perspectiva elemental de la teoría de Bohr. Dos interacciones magnéticas están asociadas con el electrón en una órbita de Bohr. (Despre-

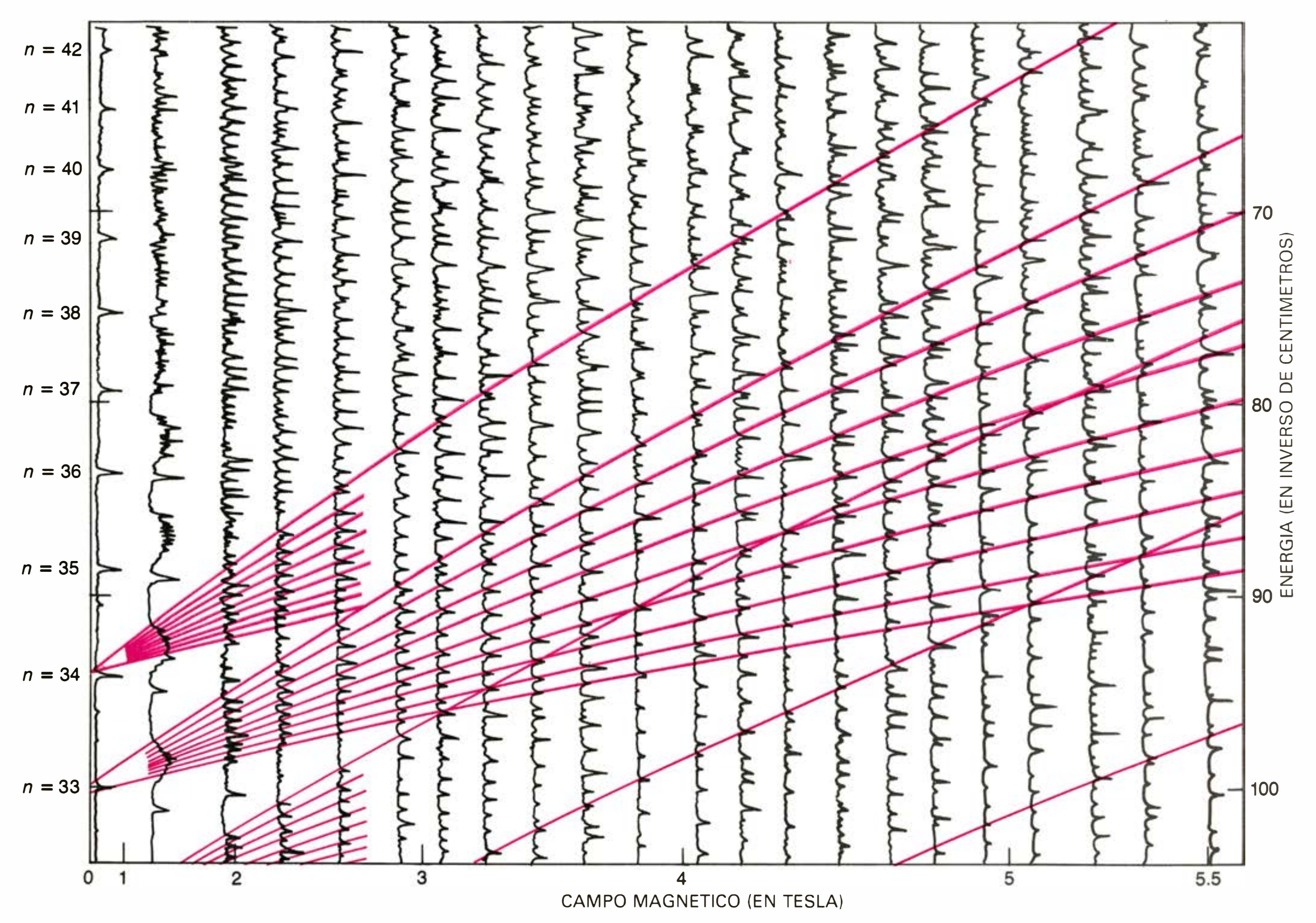


EN UN CAMPO MAGNETICO, el hidrógeno puede tomar un tercer conjunto de formas para la familia de estados de $n = 8$, $m = 0$ en los que el momento angular tiene una mezcla de valores desde $l = 0$ hasta $l = 7$. (Otras formas para la misma familia de estados se muestran a la misma escala en las ilustraciones de William P. Spencer.) Se sabe poco acerca de las propiedades de los átomos en un campo magnético fuerte. En el átomo de hidrógeno, el sistema es bastante sencillo y las ecuaciones que describen el sistema se plantean fácilmente, pero no se conocen métodos generales para resolverlas. La dificultad para desarrollar una teoría general de los átomos magnéticos reside, en parte, en que las líneas nodales no pueden describirse por ningún sistema coordenado conocido. Cerca del protón, las superficies nodales son esféricas debido a que domina la fuerza de Coulomb; pero lejos del protón, las superficies nodales son cilíndricas ya que entonces priva la fuerza magnética. (La fuerza magnética no está dirigida hacia el protón, sino hacia el eje del campo.)

ciaremos algunos efectos pequeños que resultan del spin del electrón y del magnetismo nuclear.) La primera interacción viene del movimiento orbital del electrón. Un electrón que se mueve en una órbita equivale a una pequeña corriente que fluye en una espira de alambre; el electrón en movimiento constituye un pequeño electroimán. La intensidad del imán, llamada momento magnético, es tan pequeña que, incluso en un campo fuerte aplicado, la interacción es débil. Aun así, puede detectarse la interacción: hace que las líneas del espectro atómico desplacen su frecuencia; si bien la irrelevancia de desplazamientos tan pequeños exige el concurso de un poco de ingenio para observarlos. Los vio, por vez primera, el físico holandés Pieter Zeeman y constituyen el denominado efecto Zeeman.

La segunda interacción magnética resulta de la ley de inducción electromagnética formulada por Michael Faraday: un campo magnético cambiante origina un campo eléctrico. Si un campo magnético perpendicular a una espira de alambre aumenta, el campo eléctrico inducido hace que fluya una corriente por la espira. La corriente, proporcional al área de la espira, recibe el nombre de corriente diamagnética. De manera análoga, la corriente diamagnética inducida en un átomo de Rydberg por un campo magnético externo es proporcional al área de la órbita del electrón excitado. Como el área de una órbita de Rydberg aumenta en razón de n^4, la interacción diamagnética crece también en esa relación de n^4. Por otro lado, la energía electrostática que liga el electrón al núcleo varía en una proporción de l/n^2. Así pues, la razón de la energía magnética a la energía electrostática de enlace aumenta como n^6. Para $n = 30$ la razón es casi mil millones de veces mayor que para $n = 1$. La razón para $n = 30$ es tan grande, que la fuerza magnética no puede considerarse ya como una leve perturbación de la fuerza eléctrica del núcleo. Por el contrario, es la fuerza eléctrica la que constituye una pequeña perturbación.

En realidad, la situación es más compleja. La fuerza magnética que actúa sobre el electrón es grande cuando éste se mueve perpendicularmente al campo magnético, pero es nula cuando el electrón lo hace paralelamente al campo magnético. Por tanto, la fuerza magnética domina el movimiento en el plano perpendicular al campo, mientras que en la tercera dimensión (es decir, en la dirección del campo) reina la fuerza eléctrica. En consecuencia, el movimiento es extraordinariamente complicado y no disponemos todavía de un conocimiento cabal del mismo. Nos parece, sin embargo, que un sistema tan fundamental como el formado por un electrón, un protón y un campo



ESTRUCTURA MAGNETICA DE UN ATOMO de Rydberg. Se encuentra variando la intensidad del campo magnético aplicado y registrando la señal de ionización. Por caótico que parezca el diagrama de niveles energéticos, la verdad es que tiene fuertes regularidades. Los niveles energéticos forman familias de curvas lentamente variables. Las líneas de color se han dibujado a través de varias de las curvas. Las líneas pueden verse mejor mirando la ilustración desde la parte inferior izquierda. El hecho de que los niveles energéticos se crucen sin ninguna repulsión visible indica que existe una simetría subyacente en el sistema. La simetría no se conoce, pero si pudiera identificarse proporcionaría la clave de una solución geneal del problema del campo magnético. Los datos fueron obtenidos por Jarbas C. Castro y Randall G. Hulet del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ambos. La escala horizontal se ha tomado proporcional al cuadrado del campo magnético, porque la interacción del átomo con el campo es proporcional al cuadrado del campo.

magnético no debería ser complejo, sino sencillo. Decidimos medir los niveles energéticos de átomos de Rydberg en campos magnéticos fuertes con la esperanza de que los datos conducirían a algún conocimiento nuevo.

Representamos los niveles energéticos para numerosos valores del campo magnético, de manera muy parecida a como suelen tomarse los datos en el caso de un campo eléctrico. Los resultados constituyeron una agradable sorpresa. El mapa de los niveles energéticos está tan estructurado que, a simple vista, nadie diría que habría ritmo o razón (tal como uno esperaría de algún movimiento extremadamente complicado); la verdad es que el mapa muestra grandes regularidades. Si se contemplan los niveles energéticos desde la perspectiva adecuada, se nos manifiesta un esquema sencillo. A medida que aumenta el campo magnético se desplazan los niveles energéticos, y la serie de niveles desplazados forma un esquema de líneas rectas. Los niveles de diferentes grupos se cruzan libremente. Como indicábamos al recordar la estructura Stark, los niveles pueden cruzarse sólo cuando hay alguna simetría especial en el problema. La existencia de una tal simetría sugiere la realidad de alguna regularidad subyacente en el movimiento. Si pudiéramos identificar la regularidad, tendríamos la clave para la solución total del problema.

Nuestros hallazgos armaron cierto revuelo porque nadie ha logrado identificar una simetría especial en el problema del campo magnético y domina la opinión general de que no existe ninguna. De hecho, nuestro hallazgo no contradice esa suposición, porque hemos encontrado que la simetría no es exacta. Si en vez de examinar estados de Rydberg abordamos los estados bajos, la simetría brilla por su ausencia: los niveles energéticos están desordenados y el sistema parece descorazonadoramente complejo. Aunque la simetría nunca es exacta, constituye una mejor aproximación a medida que n va creciendo. Para los valores de n que nosotros estudiábamos, la simetría resultaba exacta a todos los fines prácticos.

Seguimos investigando en torno a la simetría con todas las implicaciones que nuestros hallazgos comportan. Logremos o no resolver el problema del campo magnético, es mucho lo que hemos aprendido ya en los experimentos. La naturaleza guarda aún no pocas sorpresas en los sistemas más sencillos, en espera de que nos decidamos a echarles un vistazo.

El girasol

A lo largo de los últimos diez años, el girasol, cultivado principalmente por el aceite de sus semillas, se ha convertido en un factor destacado de la agricultura mundial. Alcanza ya el segundo puesto entre las fuentes de aceites vegetales

Benjamin H. Beard

En 1716 le fue concedida a Arthur Bunyan una patente inglesa para un proceso por el cual "de una cierta semilla inglesa podría exprimirse un buen aceite dulce de gran utilidad para todas las personas interesadas en la manufactura de la lana, pintura, cuero, etcétera... para hacer cuyo aceite debe exprimírsele de las semillas de las flores comúnmente conocidas por el nombre de girasoles de todas clases, dobles y sencillas". Esta patente fue la primera manifestación en Europa de un proceso que ha llegado a situar al girasol en el segundo puesto, inmediatamente detrás de la soja, entre las materias primas de aceites vegetales. En muchos países constituye uno de los cultivos de mayor importancia económica. La medida de su creciente interés la da el hecho de que la superficie dedicada a su cultivo aumentó, en los Estados Unidos, desde unos pocos miles de hectáreas en 1970, hasta más de millón y medio en 1980. La mayor parte de las semillas cosechadas se dedicaron a la extracción de lo que ahora se conoce corrientemente en los países de habla inglesa como "sunoil" (aceite de girasol), que alcanzó en la campaña 1979-80 una producción de 5,6 millones de toneladas.

La Unión Soviética ha ido en cabeza durante muchos años, en la producción mundial de semilla de girasol, reservándole de 4,5 a 5 millones de hectáreas cada año, producción que ha permanecido bastante estable desde 1960. Argentina se sitúa en segundo lugar, con más de un millón de hectáreas anuales, desde 1965. Le siguen en importancia los Estados Unidos, Australia y Canadá. La superficie total cultivada de girasoles en 35 países aumentó, de 6,5 millones de hectáreas en los años cincuenta, a más de 9,8 millones en 1977.

El girasol pertenece a la familia de las Compuestas, la mayor de las plantas vasculares, figurando también entre sus miembros los ásteres, crisantemos, dalias, lechugas, caléndulas, ambrosías y zinias. La propiedad de la planta de volverse hacia el sol durante el día explica tanto su nombre común como su nombre botánico: girasol, *Helianthus* (del griego *helios,* sol, y *anthos,* flor). El movimiento heliotrópico de la cabeza se produce por la torsión del tallo, y recibe el nombre de "nutación". Tras el ocaso, el tallo se endereza gradualmente, de suerte que, al amanecer, la cabeza mira nuevamente hacia el este. Cuando la flor alcanza el estadio de antesis (esto es, la apertura de las flores), cesa la nutación; a partir de entonces, las flores se encaran siempre hacia el este.

Se conocen unas 100 especies de *Helianthus,* 50 de las cuales proceden de Norteamérica y 15 de Sudamérica. Las plantas de este género tienen muchas flores pequeñas reunidas en el *capitulum* (nombre botánico de la cabeza). El dorso de la cabeza está cubierto de pequeñas brácteas verdes, llamadas "filarias". Por encima de ellas se disponen las conocidas estructuras radiales, parecidas a pétalos, llamadas "flores de lengua" o lígulas, que no intervienen en la función reproductora, salvo que puedan servir de señal para las abejas y otros insectos polinizadores.

Dentro de las lígulas, hacia el centro, encontramos muchas florecillas completas, conocidas como "flores en tubo". Cada florecilla puede desarrollar una aquena, o semilla, como la llamaremos, si bien, desde un punto de vista rigurosamente botánico, se trata de un fruto. Una planta madura tiene de 250 a 1500 semillas de ésas, ordenadas en espiral dentro del gran círculo central rodeado por las lígulas.

La importancia económica del girasol estriba en que, cultivado en terrenos adecuados, produce más aceite por unidad de superficie que cualquier otra planta. El rendimiento de las explotaciones modernas puede sobrepasar los 3000 kilogramos de semilla por hectárea, aunque la media no suele alcanzar los 1500. En las plantas que se cultivan para aceite, un 40 por ciento del peso de las semillas es aceite de alta calidad y sin componentes tóxicos.

La primera descripción pública del girasol se encuentra en un herbario de 1568 confeccionado por Rembert Dodoens. Aunque éste y otros herbarios posteriores atribuyen al Perú o a Centroamérica la patria de origen de la planta, los expertos creen hoy que el girasol común surgió en América del Norte, probablemente en lo que constituye el suroeste de los Estados Unidos. La exploración arqueológica en distintos puntos de la Unión ha sacado a la luz restos de girasoles, unos silvestres y otros domesticados. Las pruebas de su cultivo se remontan hasta 3000 años a. de C. en yacimientos arqueológicos de Arizona y de Nuevo México.

Los pioneros europeos que se adentraron en América del Norte dieron cuenta, a su vuelta, del uso de semillas de girasol por parte de los indígenas. Algunas tribus utilizaban las semillas silvestres, pero las había que cultivaban el girasol, entre otras cosechas. Antes incluso de la llegada de los europeos, los nativos conocían la superioridad de las plantas de un solo tallo (las que ac-

CAMPO DE GIRASOLES en una explotación agrícola de las proximidades de Fargo, Dakota del Norte. En esta época, que corresponde a los 30 o 40 días de maduración, las flores miran constantemente al este; pero antes de la floración las cabezas siguen al sol durante todo el día, mediante una torsión del tallo, y quedan mirando al oeste después del ocaso. Durante la noche se endereza el tallo y, al amanecer, la cabeza mira nuevamente al este. Las técnicas de cultivo del girasol a tan amplia escala son parecidas a las del maíz. La recolección se practica con cosechadoras, por lo que conviene secar las plantas con un agente adecuado.





GIRASOL EN LA ANTESIS, o etapa de floración; desarrolla dos tipos de flores: lígulas, o flores en lengua, que son las amarillas, y flores en tubo, muy pequeñas, que ocupan el centro, rodeadas por las lígulas como si fueran rayos solares. Las aquenas o semillas proceden de las flores en tubo. En la foto aparecen estas últimas en diversas etapas de su desarrollo; las más próximas al centro no se han abierto aún.





SEMILLAS DE GIRASOL, que son de dos tipos: oleaginosa (*izquierda*) y de uso de boca o no oleaginosa (*derecha*). Las oleaginosas son negras y con un contenido en aceite del 40 por ciento o más. El residuo, tras haberse extraído el aceite, es una harina proteínica que sirve de alimento para los animales. Las semillas no oleaginosas son blancas o grises, con bandas negras, grises o marrones. Su contenido en aceite es del orden del 30 por ciento. Las mayores se emplean para uso de boca y, el resto, como piensos para aves.

tualmente se cultivan), que tienen mayor la cabeza y semillas más grandes, sobre las ramificadas de uso ornamental, y habían protegido su conservación. De hecho, fueron ellos los primeros en mejorar las plantas de girasol, quién sabe si por azar o por una selección basada en las preferencias de las diferentes tribus.

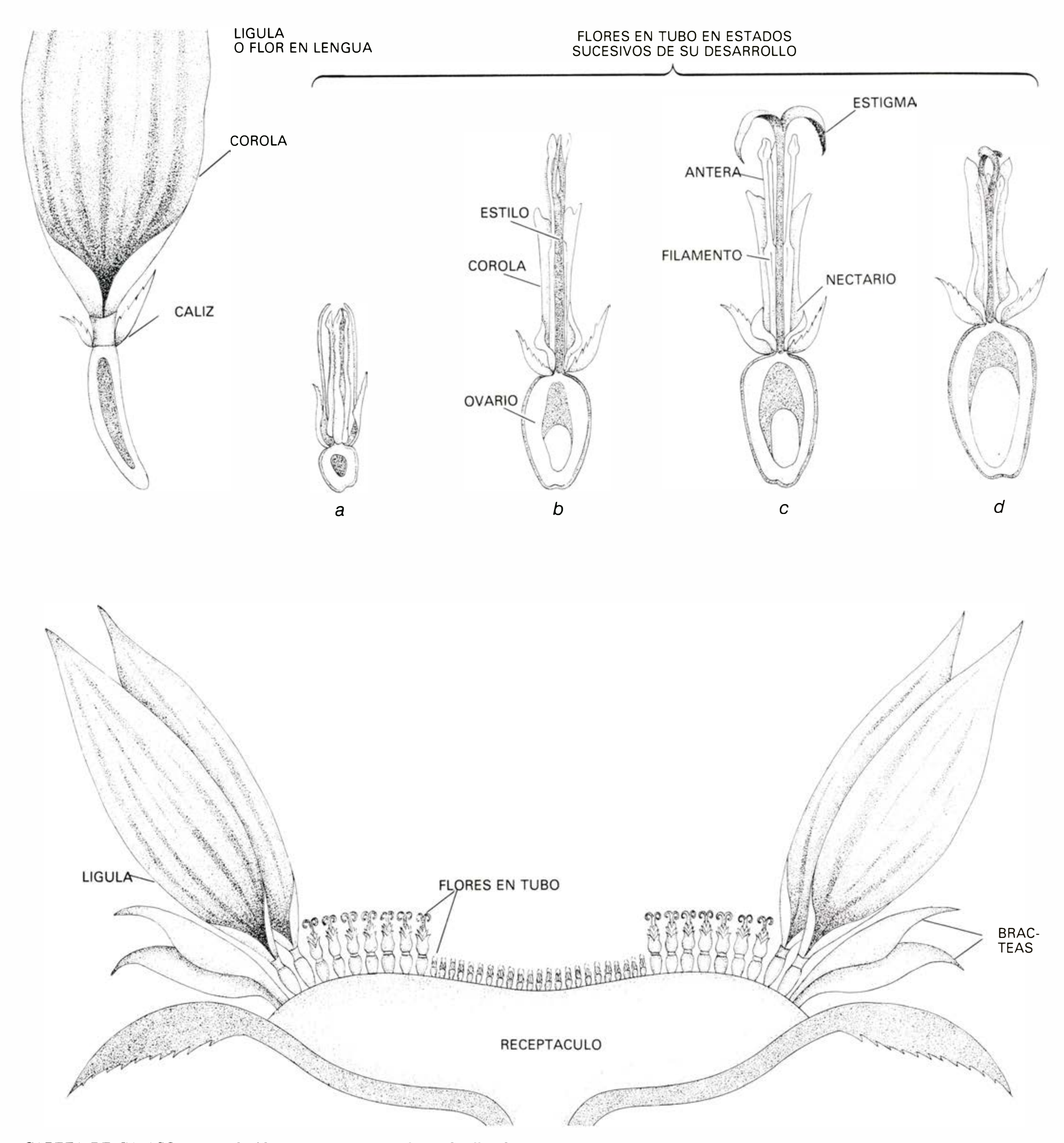
Las semillas de girasol llegaron a Europa a finales del siglo XVI (su entrada en España se fecha en 1581). Debido a su carácter exótico, se plantaron en jardines como plantas ornamentales. Su uso se extendió gradualmente por Europa, hasta recalar en Rusia. Allí, el girasol se convirtió muy pronto en un cultivo importante, en parte quizá porque la Iglesia prohibía el consumo, durante la Cuaresma, de casi todos los alimentos ricos en grasa; el girasol era demasiado reciente para hallarse incluido en la lista de prohibiciones.

El creciente interés en Rusia por el cultivo motivó los ensayos de selección. Hacia 1880 había ya compañías estadounidenses, dedicadas a la venta de semillas, que ofrecían el "mastodóntico" cultivar ruso. Diez años después se introdujeron varios cultivares procedentes de Rusia. Aunque se ganó la atención de los norteamericanos, el girasol no llegó a adquirir un lugar prominente en su agricultura.

Pero los agrónomos empezaron ya, en esa década de 1890, sus experimentos de mejora de la planta. Los primeros esfuerzos se encaminaron a obtener variedades resistentes a una cierta polilla, "palomita" o "mosca del girasol" (*Homoeosoma nebullela*) que, en su estado larvario, se come las semillas germinadas. Los principales resultados conseguidos en los primeros programas de mejora fueron una madurez más temprana y más alto contenido en aceite.

Posteriormente, tuvo mucho éxito un programa de mejora desarrollado por V. S. Pustovoit en la Unión Soviética. En 1940, la riqueza media en aceite de casi todas las semillas de girasol de explotación comercial era de un 33 por ciento; en 1965, Pustovoit ensayaba ya variedades con un contenido en aceite de más del 50 por ciento, y había obtenido también girasoles resistentes al jopo, una planta parásita que crece en las raíces. El carácter resistente lo sacó de cruces con especies silvestres.

En 1942, Eric D. Putt, del Ministerio de Agricultura del Canadá, desarrolló una variedad más corta de tallo y de maduración temprana, llamada "sunri-

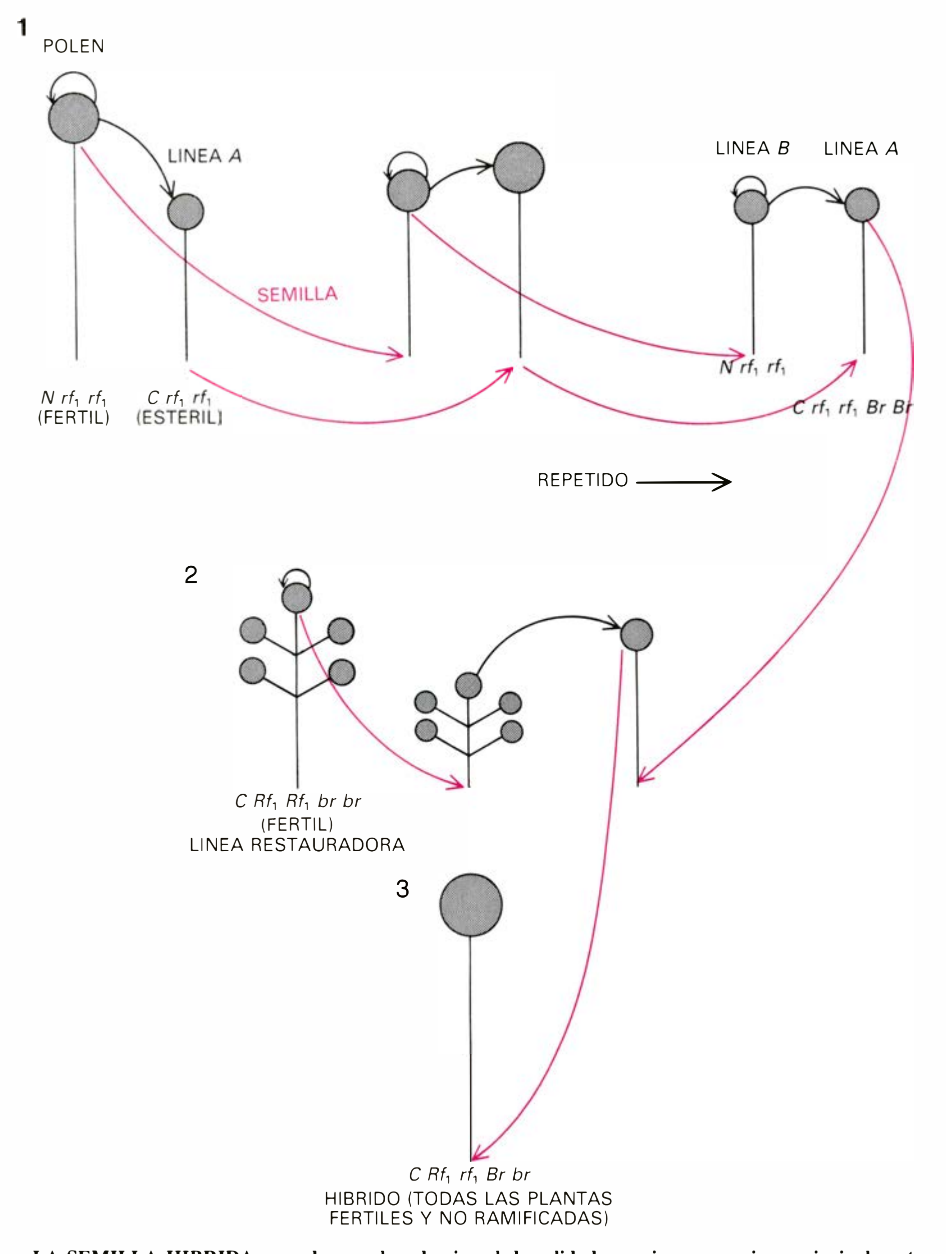


CABEZA DE GIRASOL, reproducida en corte transversal con detalles de una flor en lengua y de flores en tubo. Estas últimas se muestran en cuatro etapas de su desarrollo: antes de la apertura (*a*), cuando se suelta el polen (*b*), uno o dos días más tarde (*c*) y unos dos días después de la polinización (*d*).

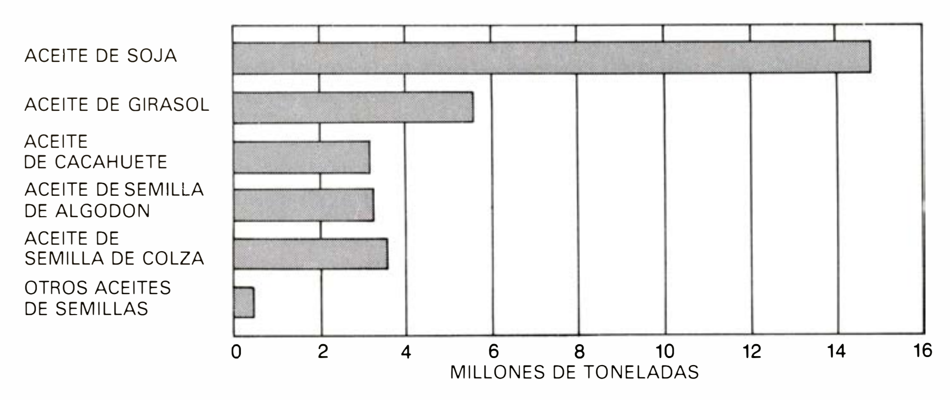
se". Su época de esplendor duró de 1943 a 1948, pero el clima desfavorable y el ataque de los mohos determinaron que los campesinos abandonaran su cultivo. Hacia 1955, Putt y Waldemar E. Sackston habían ya descubierto caracteres de resistencia a los mohos en algunas especies silvestres; el desarrollo de nuevas variedades con tal característica volvió a animar a su cultivo.

Todavía en la década de los 50 y en la de los 60, hasta los mejores cultivares carecían de regularidad en sus resultados. Así, las matas de un mismo campo no llegaban a la antesis al mismo tiempo, sino en un intervalo de entre tres y cinco semanas; había que posponer, pues, la recolección hasta que hubiese madurado la mayoría, retraso que era costoso. Además, para proteger las plantas contra los insectos y otras plagas se requería más de un tratamiento, lo que encarecía todavía más la inversión.

Putt había demostrado que las semillas obtenidas por polinización cruzada entre dos líneas homozigóticas diferentes daban plantas con un rendimiento de hasta el 25 por ciento mayor que las procedentes de cultivos abiertos en los



LA SEMILLA HIBRIDA, que da cosechas de girasol de calidad superior, se consigue principalmente, hoy en día, por el sistema de la esterilidad masculina citoplásmica, expresión que designa el hecho de que un cierto factor del citoplasma de las células las hace masculino-estériles (*C* rf_1 rf_1). También intervienen en el proceso plantas con citoplasma normal (*N*) o con capacidad para restaurar la función masculina (Rf_1). La conversión de plantas normales en líneas parentales con esterilidad masculina citoplásmica comienza (*1*) con una línea fértil, normal, que se cruza con una línea masculino-estéril. El proceso se repite durante cuatro o más generaciones para crear una línea mixta, *A*, que, además de poseer esterilidad masculina, lleva un gen para no ramificarse (*Br Br*). Las plantas nacidas de sus semillas se cruzan (*2*) con una línea restauradora y las semillas resultantes dan híbridos (*3*) que son fértiles y no ramificados.



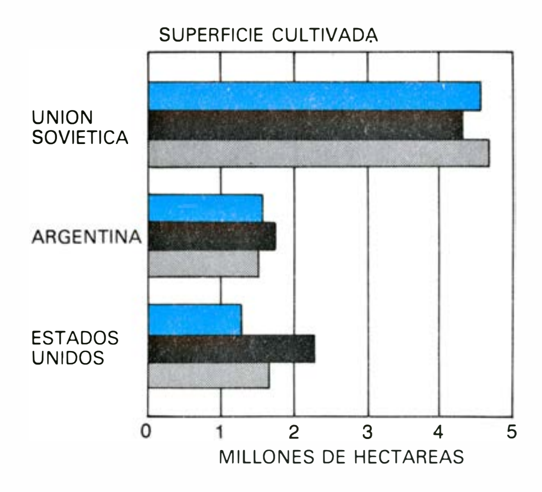
CLASIFICACION DEL ACEITE DE GIRASOL según los datos previstos para la campaña de 1979-80 (las cifras corresponden a los Estados Unidos). "Otros aceites de semillas" incluye los de colza, sésamo y maíz.

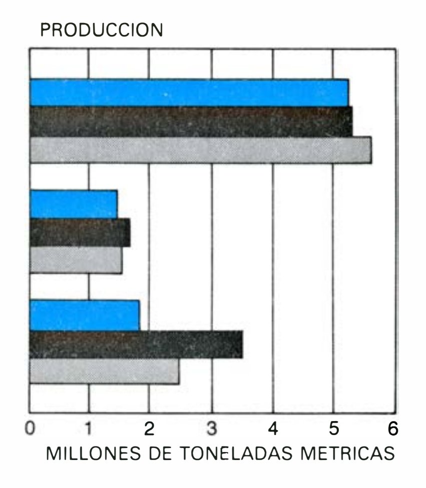
que el polen podía tener cualquiera origen. Las distintas formas de un determinado gen se llaman alelos. Un par de genes alélicos, uno de cada progenitor, se escriben en la "taquigrafía" genética del siguiente tenor: *Aa.* La planta que posea los dos genes idénticos, *AA* o *aa,* será homozigótica para ese alelo; si los genes fueran diferentes, *Aa,* sería heterozigótica. Las observaciones de Putt, unidas al éxito alcanzado por los maíces híbridos, indicaban que el mejor cambio para incrementar la uniformidad de las plantaciones y elevar el rendimiento del girasol era desarrollar un sistema económicamente viable de producción de semillas híbridas.

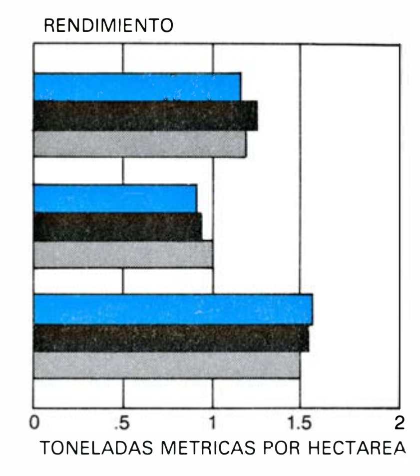
Para obtener semillas híbridas hay que evitar la autopolinización y la polinización por una planta hermana. Lo que se pretende es conseguir una línea parental "femenina" que acepte polen de otras líneas (polinización cruzada) y no reproduzca su propia línea. La forma más directa es por emasculación, o sea, por eliminación del órgano portador del polen, a costa, normalmente, de un gran consumo de mano de obra. Hay otros medios de provocar la esterilidad masculina.

Varios investigadores, entre ellos Murray L. Kinman, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, se aprestaron a desarrollar un sistema de hibridación basado en la autoincompatibilidad de líneas de girasol. La autoincompatibilidad es una característica de ciertas plantas en las que el polen no puede actuar sobre los estigmas del mismo individuo. Pretendían crear una línea cuyos miembros poseyeran esta característica, es decir, que no hubiera autopolinización ni polinización por plantas hermanas. Si se sembrasen dos líneas así en un campo aislado, las semillas de todas las plantas serían híbridas. El único polen capaz de actuar sobre cualquier planta sería el procedente de individuos de la otra línea. Este método permitió conseguir altos porcentajes de semilla híbrida, pero no acabó del todo con la autofecundación. Al no cumplir los requisitos legales, no se les concedió a las semillas la certificación de híbridas.

A. V. Vranceanu, en Rumanía, consiguió obtener semillas híbridas mediante un sistema genético masculino-estéril; es decir, a partir de plantas que carecían de función masculina por acción de un determinado gen. En este sistema, una línea parental que sirve de hembra se planta en el campo de producción de semillas. La línea se bifurca-







EL CULTIVO DEL GIRASOL se practica a escala extensiva, según reflejan estas gráficas en las que están recogidas las cifras de los tres principales países productores en 1978 (*color*), 1979 (*negro*) y 1980 (*gris*). Las cifras de producción y los rendimientos se refieren a semilla recolectada anualmente. Una tonelada métrica de semilla de alta calidad produce unos 400 kilogramos de aceite. El empleo de híbridos ha mejorado considerablemente los rendimientos.

rá en la proporción de 1:1, esto es, una planta masculino-fértil por una masculino-estéril. En el sistema de Vranceanu, el alelo de fertilidad estaba íntimamente ligado a un gen dominante que causaba la aparición de un pigmento rojizo de antocianina en las plantas que daban semillas, marca que permitía separar fácilmente las plantas fértiles antes de que soltasen su polen, dejando sólo las estériles para la producción de híbridos. El método requiere, no obstante, trabajo adicional y aumenta el costo de la semilla híbrida. Además, algunas plantas sin antocianina siguen siendo fértiles, lo que merma su eficacia.

A través de ese sistema se llegó a la producción de una buena cantidad de semilla híbrida. Pero el método, que se explotó comercialmente en muchos países a lo largo de la década de los setenta, se fue abandonando en la mayoría de ellos, sustituido por el de la esterilidad masculina citoplásmica, en la que un factor presente en el citoplasma de las células determina que, en la segunda generación, sean todas masculino-estériles.

La esterilidad masculina citoplásmica no constituía ninguna novedad. Descubierta en el girasol hacia 1958, ocurría, sin embargo, que las plantas daban siempre alguna progenie fértil, resultante de la polinización por líneas ordinarias fértiles. En 1969, Patrice Leclercq, en Francia, informó haber obtenido esterilidad masculina citoplásmica en la progenie de un cruce de *Helianthus petiolaris* Nutt. y de *H. annuus*. La semilla se envió a productores de todo el mundo y se demostró satisfactoria para la explotación comercial de semillas híbridas de girasol. Kinman y otros añadieron el eslabón que faltaba en la cadena al hallar, hacia 1970, las líneas necesarias para restaurar la fertilidad.

Dos años más tarde, disponían ya los agricultores de las primeras semillas híbridas producidas por este sistema. En 1976, un 80 por ciento de la cosecha de girasol de los Estados Unidos procedía de semillas híbridas. Los mejores híbridos rendían el 20 por ciento más que las mejores plantaciones de polinización abierta. Gracias a este rendimiento, unido a un porcentaje más alto de aceite y a un tiempo de maduración igual para todas las plantas, se pueden emplear en su cultivo las técnicas agrarias más adelantadas.

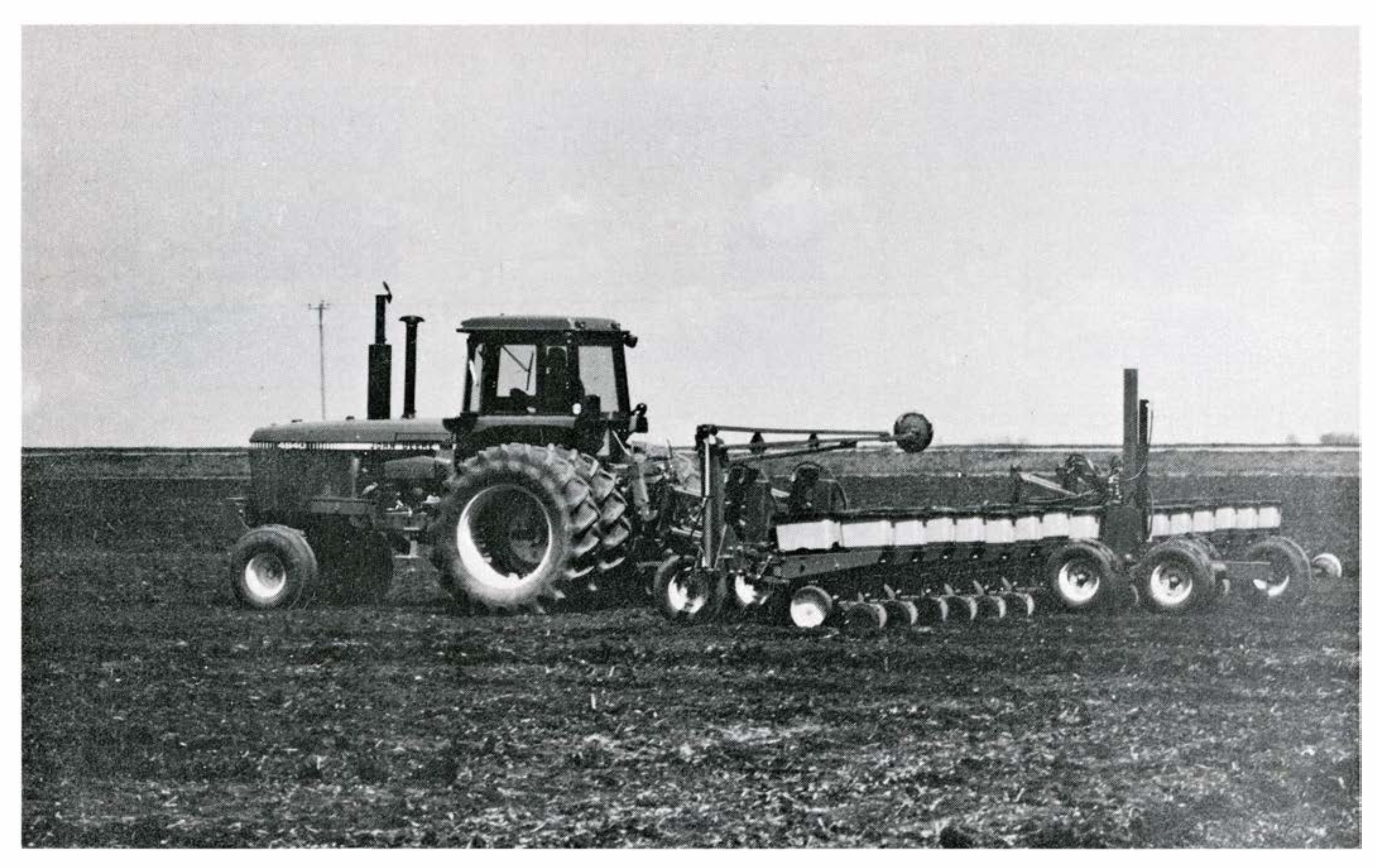
Los primeros híbridos eran sensibles a numerosas enfermedades. Gerhardt N. Fick y David E. Zimmer, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, aislaron genes dominantes que conferían resistencia a la mayoría de ellas. Y así, las pérdidas causadas por enfermedades han bajado mucho.

El modo de siembra varía de acuerdo con la maquinaria de que disponga el agricultor. Una práctica habitual, cuando la sembradora cubre seis u ocho surcos a la vez, consiste en llenar la tolva de uno de los extremos con semilla de la línea restauradora masculina y las otras cinco (o siete) con la semilla parental estéril. Tras dos pasadas de la máquina, la siembra será de dos líneas masculinas y 10, o 14, femeninas estériles. La distribución de polen a las plantas femeninas depende enteramente de las abejas y otros insectos polinizadores.

La producción de semillas híbridas de alta calidad no depende sólo del uso de líneas parentales de clase superior, sino también de que el campo donde se cultiven esté suficientemente bien aislado de otras plantaciones de girasol, variedades silvestres incluidas. Dado que el polen es transportado por insectos y tiene un largo período de viabilidad, no resulta fácil fijar con exactitud las condiciones de aislamiento. La Asociación de Oficinas Oficiales de Certificación (estadounidense) exige hoy un aislamiento de 0,8 kilómetros. Algunos de los estados de la Unión tienen normas particulares. Los productores de California han acordado aislamientos de 3,2 a 6,4 kilómetros, según sea el tipo de plantas vecinas susceptibles de contaminar las semillas híbridas. El aislamiento puede también conseguirse en el tiempo, es decir, cultivando plantas que llegan a la antesis en épocas diferentes; se considera adecuada una separación de un mes en la antesis.

Los agricultores cultivan el girasol por sistemas muy parecidos a los que emplean para el maíz. Las semillas se plantan con una sembradora de maíz y la recolección se hace con cosechadora. Las malas hierbas se combaten con labores y con herbicidas. Las plantas están fisiológicamente maduras cuando el dorso de las cabezas amarillea y las filarias adquieren un tono marrón. Para facilitar el funcionamiento de la cosechadora conviene a veces secar las plantas con un agente adecuado, o bien cosecharlas tras la primera helada, lo que viene a producir el mismo efecto.

La maquinaria normalmente utilizada para la recolección del girasol es del mismo tipo que la que se usa para cosechar granos de cereales; sirve también la cosechadora de maíz. Hay que dotar a la máquina de grandes bandejas, que pasan entre los surcos interceptando y recogiendo las semillas que se desprenden de las cabezas antes de que las al-



LAS SEMILLAS DE GIRASOL SE PLANTAN con una máquina sembradora de varios surcos, del tipo de las que se emplean para el maíz y el algodón. Los surcos distan entre sí de 76 a 96 centímetros. La cosecha tarda en alcanzar la madurez, según variedades, de 90 a 120 días a partir de la siembra.

RECOLECCION MECANIZADA DEL GIRASOL. La máquina se adapta a la mata poniéndole grandes bandejas metálicas que pasan entre los surcos para recoger las semillas que se desprenden prematuramente. Las bandejas, además, guían los tallos hacia el cortador, que separa las cabezas de los girasoles. A continuación, la máquina desgrana y limpia las semillas. La recolección se practica generalmente tras la primera helada, o bien aplicando a las plantas sustancias desecadoras, ya que la máquina trabaja en mejores condiciones cuando los girasoles maduros están secos y se vuelven más frágiles.

cance la barra cortante. Estas bandejas guían también los tallos hacia la barra para que las cabezas segadas lleven sólo un corto trozo de tallo. Las cabezas y tallos van después al cilindro desgranador de la máquina. Todas las cosechadoras modernas se pueden ajustar para trillar y limpiar semillas de girasol con escasas pérdidas por golpes y roturas. Antes de almacenarlas, se secan las semillas.

Se explotan comercialmente dos tipos de girasol. El de uso de boca, llamado también girasol no oleaginoso, da plantas de 2,5 a 4 metros de altura y de maduración tardía; las semillas son grandes y contienen aproximadamente un 30 por ciento de aceite; el color de la cáscara es generalmente gris o blanco con algunas bandas grises, marrones o negras.

La otra clase es el girasol oleaginoso, cuyas plantas alcanzan generalmente de 2 a 2,6 metros de altura y maduran muy pronto. Las semillas son negras y con un contenido en aceite por encima del 40 por ciento. Sería fácil conseguir, mediante los cruzamientos adecuados, que todas las semillas de girasol tuvieran igual aspecto; pero las diferencias de color entre las semillas oleaginosas y las de uso de boca vienen impuestas por los seleccionadores para distinguirlas con vistas a su comercialización. Se cree también que las personas que comen pepitas de girasol las prefieren con bandas grises o blancas.

Ambos tipos de girasol se cultivan de forma similar, salvo en lo que respecta a la separación entre plantas. Las semillas grandes se cotizan más para el uso de boca; y como el tamaño de las semillas se correlaciona con el de las cabezas y éste con la distancia entre plantas, los campos cultivados para semillas de uso de boca contienen de 100 a 120.000 plantas por hectárea, mientras que los de oleaginosos contienen hasta el doble.

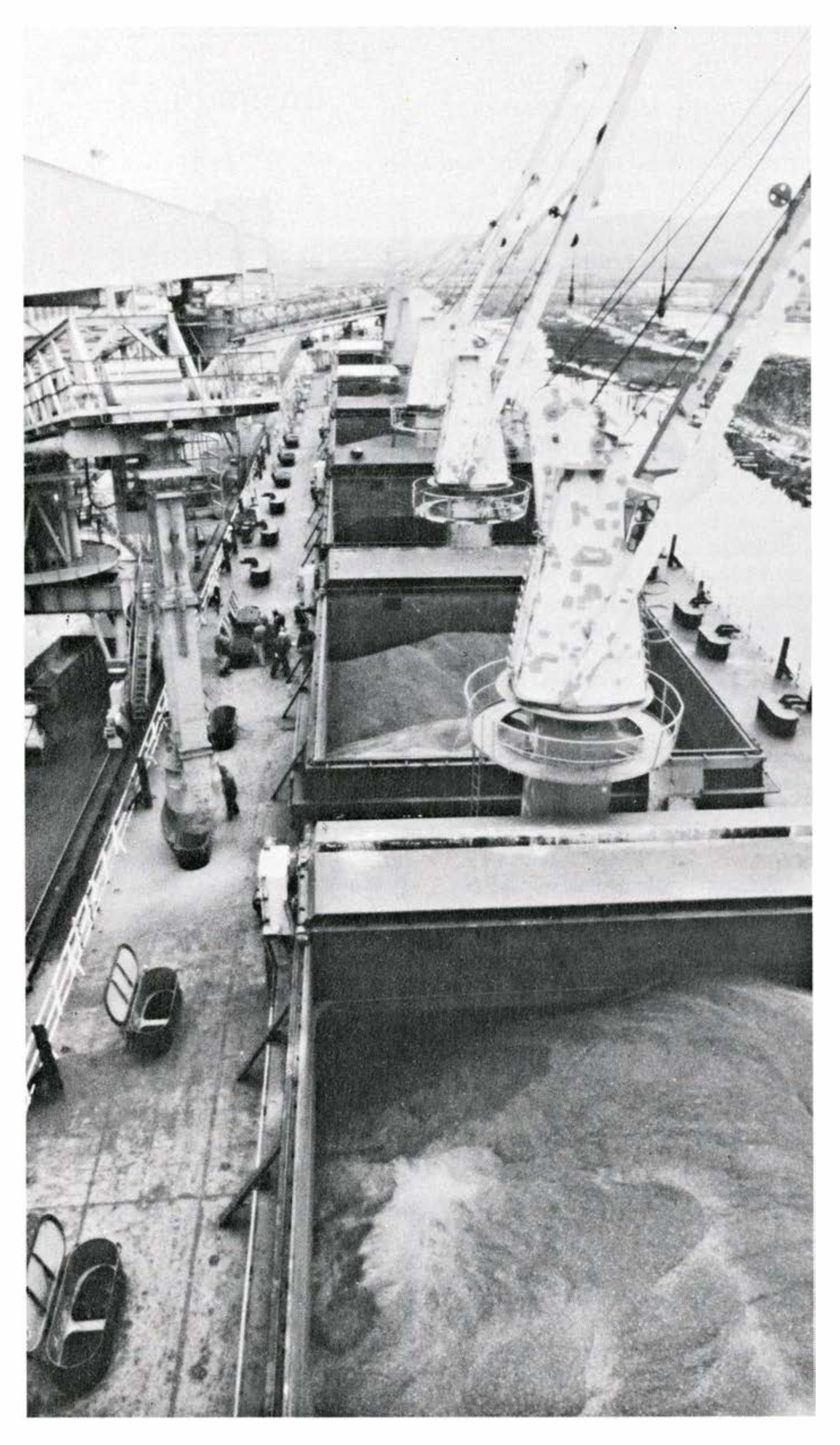
Hasta 1970, la mayoría de las cosechas de girasol que se plantaban en Estados Unidos eran del tipo uso de boca. El volumen de esta producción ha cambiado poco con los años. Tras la recolección, las semillas de mayor tamaño se separan para tostarlas y venderlas para picar, bien enteras, bien descascarilladas. Las semillas más chicas se venden de alimento para aves o piensos de gallinero.

Los girasoles oleaginosos no cobraron importancia en los Estados Unidos hasta ya avanzada la década de 1960. Su producción creció a buen ritmo durante los años setenta, estimulada por un mercado creciente en Europa y por las mejoras en el porcentaje de aceite de las semillas, que le permitían al agricultor obtener mayores ingresos por un mismo volumen de cosecha. Las semillas recolectadas se molturan y el aceite se extrae por presión y por disolventes. El resultado es, no sólo un aceite de buena calidad, sino también una harina rica en proteínas.

El aceite de girasol, rico en ácidos grasos poliinsaturados y pobre en saturados, sirve, al igual que otros aceites vegetales, para una gran variedad de productos alimenticios (margarinas, mayonesas y aceites para ensaladas) y también para usos de cocina. Se emplea en pinturas, barnices y en ciertos plásticos. Ensayos recientes en pequeña escala indican que el aceite crudo puede usarse como combustible en motores diesel. Puro, puede dar problemas en el arranque, pero la mezcla con gasoil al 50 o 75 por ciento de este último dio buenos resultados en todas las pruebas. Todavía el aceite de girasol cuesta algo más que el gasoil, pero la diferencia va disminuyendo. Si se consigue aumentar el rendimiento en aceite por hectárea mediante mejora en los métodos de cultivo, el girasol podría llegar a convertirse en una fuente renovable de combustible de buena calidad para motores diesel.

La harina cruda de girasol, con un contenido del 38 al 40 por ciento en proteínas, constituye un buen suplemento proteínico para piensos de ovinos y bovinos. El contenido de fibra puede reducirse si se separan las cáscaras de las semillas antes de extraer el aceite, resultando así una harina con un 40 o 42 por ciento de proteínas, idónea para gallinas y cerdos. Mediante un tamizado cuidadoso para separar los fragmentos de cáscara, se puede conseguir una harina con el 51 o 52 por ciento de proteínas. La harina de girasol puede usarse directamente en alimentos humanos, mediante procesos adecuados, pero hasta ahora se ha avanzado poco en este sentido.

La cáscara suelta y los restos de las cabezas de girasol, quitadas las semillas, pueden usarse, una vez procesadas, para obtener pectina, el agente gelificante de las compotas y jaleas. Las cáscaras se han empleado también para aumentar el contenido en fibra de ciertos piensos para rumiantes. En algunas fábricas de aceite de girasol la única fuente de energía es el calor procedente de quemar las cáscaras. Y éstas pueden



BARCO MERCANTE cargando semillas de girasol en Duluth. Minnesota. La carga tiene por destino a Europa, importante mercado de este producto. La capacidad del barco es de unos 350.000 hectólitros.

incluso comprimirse a modo de "troncos" para quemar en las chimeneas. En pequeña escala, los tallos de girasol se han utilizado en construcción, tejidos en forma de paneles.

Se ha recurrido a la mata entera para forraje, una vez recolectada y ensilada. Algo generalizada en los Estados Unidos a lo largo de la década de los 30 y los 40, se abandonó esta práctica en vista de que otras plantas forrajeras, como el maíz, rendían más por unidad de superficie. Comparado con el maíz, el forraje de girasol viene a poseer casi igual valor nutritivo, de ahí el extenso uso que hoy se hace del mismo en Europa.

Se cultivan también otras especies de *Helianthus,* aunque a menor escala. Probablemente la más conocida sea el "girasol batatero" o tupinambo (*H. tuberosus* L.), una perenne conocida en Estados Unidos como "Jerusalem artichoke" por sus carnosos tubérculos comestibles que, guisados, poseen aroma y sabor parecidos a los de la alcachofa; se vende también como planta ornamental. Otras especies se cultivan con exclusivos fines ornamentales, como el girasol de hoja de plata, *H. argophyllus;* el girasol de Maximiliano, *H. maximiliani;* el girasol de hoja de sauce, *H. salicifolius;* el girasol de playa y el de hoja pepino, subespecies de *H. debilis;* el girasol de prado o petiolario, *H. petiolaris;* el girasol rígido, *H. rigidus,* y el coloreado, *H. atrorubens.*

De las estirpes silvestres, algunas tuvieron destacado interés a la hora de incorporar factores de resistencia contra las plagas y otros caracteres genéticos deseables en las especies domesticadas. Pero todavía no se les ha sacado todo el partido posible. Por otro lado, la vida moderna está reduciendo mucho sus habitats naturales: bosques, praderas y otros lugares tranquilos. Ya se ha extinguido una especie de *Helianthus* (*H. nuttallii* ssp. *parishii*) y por lo menos otra (*H. exilis*) está en la lista de las amenazadas. Algunas instituciones mantienen especies de girasol para sus trabajos de investigación y mejora, pero no se han hecho planes que aseguren una colección permanente. Desgraciadamente, el mantenimiento de una colección de girasoles no sólo es difícil y caro, sino que requiere especiales condiciones ambientales. Debería montarse una colección permanente de especies silvestres, procedentes de los lugares más diversos y apartados y con dinero y medios suficientes para mantenerla en perfecto estado siempre.

Parece probable que la superficie cultivada de girasol en los Estados Unidos continúe aumentando, con posibles fluctuaciones, hasta alcanzar cerca de cuatro millones de hectáreas. Es de esperar que el costo del aceite pueda llegar a nivelarse o a ser sólo un poco más alto que el del aceite de soja. Hasta ahora ha venido fluctuando entre el precio de este último y 20 céntimos de dólar más por kilogramo. Si la demanda de aceites de alta insaturación para la dieta humana continúa creciendo, el aceite de girasol será el mejor y el más barato para satisfacerla.

Cosmología y observaciones. Un análisis crítico

El modelo expansionista del Universo aparece como un todo coherente, apuntalado por el desplazamiento hacia el rojo, la abundancia de helio y la radiación cósmica de fondo. Pero, ¿son realmente válidas esas pruebas?

Mariano Moles Villamate

La historia de la cosmología moderna comienza con la controversia que a principios del siglo XX dividió a los astrónomos a propósito de la naturaleza de las nebulosas. El problema de la distancia de estos objetos implicaba la determinación de los límites del universo observado: ¿hay o no hay sistemas exteriores a nuestra galaxia?

Las nebulosas se observaron desde el descubrimiento del anteojo astronómico, aunque hay referencias sobre la de Andrómeda, en la constelación del mismo nombre, en el mapa que en el año 964 realizara Abd-al-Rahman al Sufi. Y pronto se pusieron los astrónomos y filósofos a especular sobre la naturaleza de las mismas, destacando la teoría elaborada por Kant sobre estos universos-islas, como se las llama. Naturalmente, se trataba en esa época de reflexiones teóricas. Los datos observacionales comenzaron a acumularse desde finales del siglo XVIII en forma de catálogos. Destacan los elaborados por W. Herschel entre 1780 y 1802, por su hijo J. Herschel en 1864 y, más tarde, por J. E. Dreyer de 1888 a 1908 ("New General Catalog of Nebulae and Clusters of Stars", abreviado NGC, y los "Index Catalogs", abreviados IC).

La discusión sobre la naturaleza de las nebulosas comienza el año 1917, y se centra en los indicadores de distancia, ya que son ellos los que permitirán aseverar si algunas nebulosas son o no exteriores a nuestra galaxia. Y entre esos indicadores la discusión gira en torno a las estrellas "novae", que proporcionan resultados aparentemente contradictorios. Ritchey descubre una nova en NGC 6946, y Curtis identifica otras, a partir de placas de archivo, en NGC 4227 y NGC 4321. Estas novae, diferentes de las ya conocidas, prueban, según Curtis, la naturaleza extragaláctica de las nebulosas donde se han hallado. A partir de los mismos datos, Shapley concluye, sin embargo, justamente lo contrario, porque, en su opinión, las distancias implicadas por el argumento de Curtis supondrían enormes luminosidades para esas estrellas, y en particular para la nova S And. Para intentar salir del atolladero, el astrónomo sueco Lundmark formuló la hipótesis, en 1920, de que existían dos clases de novae, perteneciendo S And a la nueva clase que años más tarde será llamada por Zwicky clase de "supernovae". Esta hipótesis se vería reforzada el año siguiente por el estudio y las conclusiones del mismo Lundmark sobre las estrellas más brillantes de la nebulosa de Andrómeda, que pueden identificarse. Tales hipótesis son rechazadas por un importante sector de astrónomos. En las sesiones de la Academia Norteamericana de Ciencias, tanto Curtis y sus partidarios por un lado, como Shapley con los suyos, por otro, se afirman en sus posiciones sin que nadie convenza a nadie.

Así las cosas, la solución sólo podía venir de nuevos datos de observación. E. Hubble, en 1924, estimó la distancia de M 31 (Andrómeda), M 33 y NGC 6822, gracias a la observación de variables cefeidas, cuyas luminosidades intrínsecas podían ser calibradas a partir de las cefeidas conocidas en nuestra propia galaxia. De esta manera, y aun a pesar de todas las incertidumbres asociadas, quedaba definitivamente establecido que existían nebulosas no pertenecientes a nuestra galaxia, que, por tanto, constituían otros sistemas estelares independientes: las galaxias.

La comprensión de este hecho capital, a saber, que los constituyentes básicos del Universo no eran las estrellas, sino las galaxias, constituía la condición necesaria para el desarrollo de la cosmología moderna. Este Universo, formado por las galaxias como "unidades elementales", fue objeto de intensos estudios por parte de los astrónomos que querían determinar las leyes que lo gobiernan. Así, una de las primeras tareas, ya comenzada antes de 1924, consistió en determinar el movimiento del Sol con respecto a las nebulosas. En efecto, el desplazamiento de las líneas espectrales con respecto a sus posiciones medidas en el laboratorio, es decir, el desplazamiento de sus longitudes de onda, se atribuyó al movimiento relativo entre la fuente luminosa y el observador; se interpretaba, pues, como un efecto Doppler. Se podía determinar así la velocidad radial de ese movimiento relativo.

Los primeros espectros de nebulosas habían sido obtenidos por Huggins en 1860, quien "casi adivinó" la presencia de líneas de absorción en los espectros que había fotografiado. A Scheiner cabe el mérito de haberlas reconocido definitivamente por primera vez en 1899, en el espectro de M 31. Los primeros desplazamientos de longitudes de onda fueron determinados en 1912 por Slipher, quien dedujo las correspondientes velocidades radiales, mayores que las conocidas en nuestra galaxia. Por el año 1922 se conocían las de 41 galaxias (todavía nebulosas por aquel entonces) que iban desde −300 kilómetros por segundo (velocidad de aproximación al observador) hasta +1800 kilómetros por segundo (velocidad de alejamiento del observador).

Y mientras los unos veían en estos valores tan altos de las velocidades radiales una prueba de la naturaleza extragaláctica de esos objetos, los otros reconocían simplemente una característica especial de un subsistema particular de nuestra galaxia, como es, por

ejemplo, el de los cúmulos globulares. Afortunadamente, por una o por otra razón, todos estaban interesados en la determinación observacional de sus velocidades radiales y en el estudio del movimiento relativo del Sol.

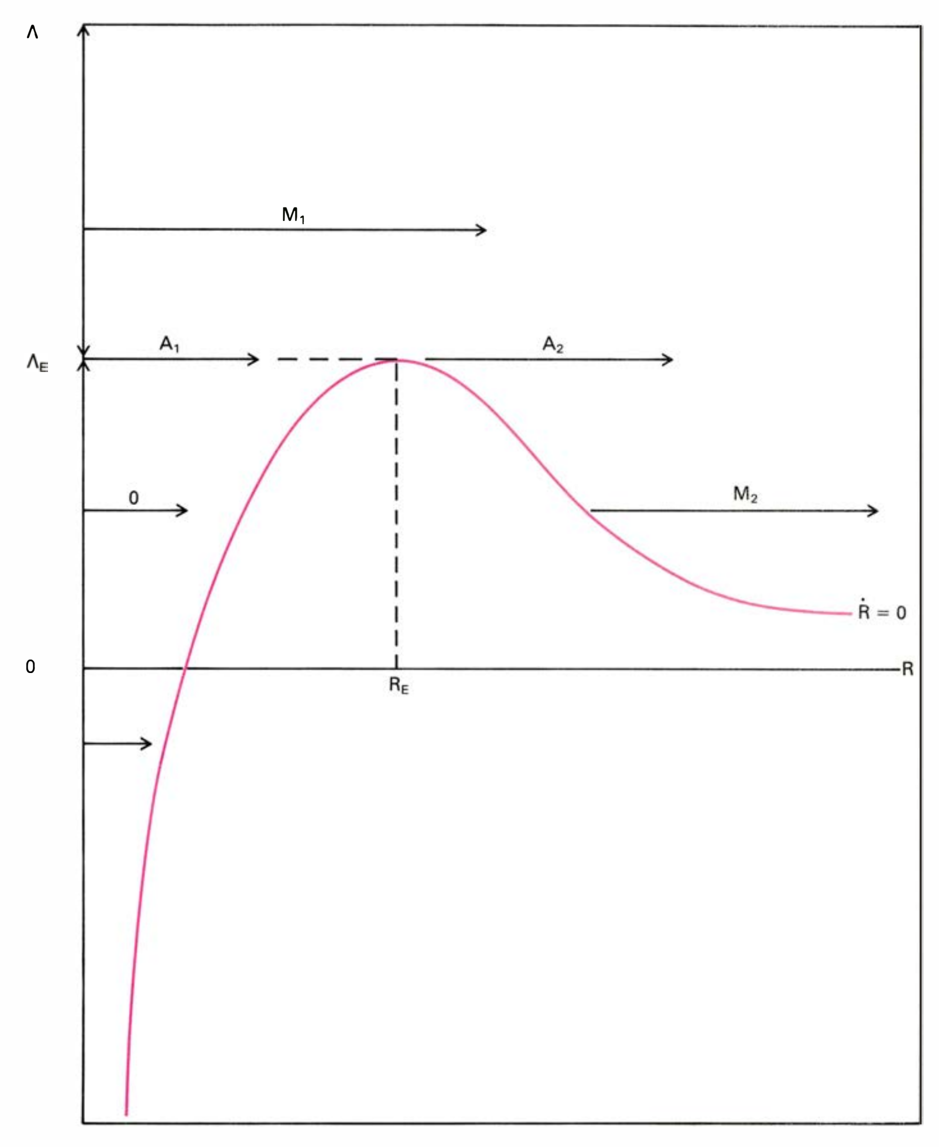
Desde que empezaron a acumularse los datos, se hizo patente una notable característica: la inmensa mayoría de las velocidades radiales observadas eran positivas, es decir, correspondían a velocidades de alejamiento con respecto al observador. En otros términos, las líneas espectrales aparecían desplazadas hacia longitudes de onda mayores, es decir, hacia el extremo rojo del espectro. De ahí el nombre de desplazamiento hacia el rojo con que se conoce este fenómeno.

Entre 1916 y 1925, Truman, Wirtz, Lundmark, Strömberg y otros estudiaron el movimiento del Sol con respecto a esas galaxias; Wirtz y Lundmark fueron los primeros en añadir un término lineal a las ecuaciones clásicas del movimiento solar. Pero fue finalmente Hubble quien estableció en 1929 la ley que lleva su nombre: la velocidad radial deducida del desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de una galaxia es proporcional, en primera aproximación, a la distancia de esa galaxia al observador. (En forma: $v = H \times r$, donde v es la velocidad, r la distancia y H la llamada constante de Hubble.)

Desde el punto de vista empírico, el universo se presentaba como formado por galaxias en aparente recesión mutua. Quedaba ahora por encontrar un marco teórico en el que esos hechos, así como los que pudieran ir descubriéndose en el futuro, pudieran integrarse e interpretarse; y que, a la vez, pudiera estimular nuevas observaciones y nuevos hallazgos. Ese marco no podía ser otro que la relatividad general. En efecto, la fuerza que aparece como dominante a gran escala es la gravitación, y la relatividad general es, desde su advenimiento, la mejor teoría sobre la gravitación de que disponemos. Pero esta razón no es suficiente, ya que la ley de atracción universal implica una relación local entre masas, por lo que el paso que supone estudiar el universo a gran escala no se presenta con carácter necesario. (En este sentido es significativo que Newton no abordase el problema cosmológico.) Pero la relatividad general va más lejos que el simple estudio de la gravitación en el sentido newtoniano, constituyéndose en auténtica dinámica que conecta aceleraciones y gravedad, estructura del espacio-tiempo y contenido material. La búsqueda de soluciones globales aparece aquí de modo natural. Desde el mismo año de 1917, Einstein se planteó la cuestión cosmológica dentro del marco de la nueva teoría.

De modo que, sobre la base de la teoría de la relatividad general y del descubrimiento por Hubble de la existencia de las galaxias y luego del fenómeno del desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las mismas, se desarrollará la cosmología del siglo XX. Los datos de observación en el dominio extragaláctico son difíciles de obtener y aún más de interpretar. A pesar de ello, la cosmología cobró nuevo auge con la existencia, desde 1924, de familias de modelos deducidos de las ecuaciones generales de Einstein, con la ayuda de ciertas hipótesis simplificadoras. Así, cuando Hubble publicó su ley, la comparación con una de esas familias de modelos, elaboradas por Friedmann, llevó rápidamente a los astrónomos a la convicción de que podían representar adecuadamente la estructura global del Universo. De la mano de la interpretación como un efecto Doppler del fenómeno del desplazamiento hacia el rojo, entraban en escena los modelos no estáticos de Friedmann, desarrollados en los años treinta con algunas variantes por Tolman, Robertson y Walker.

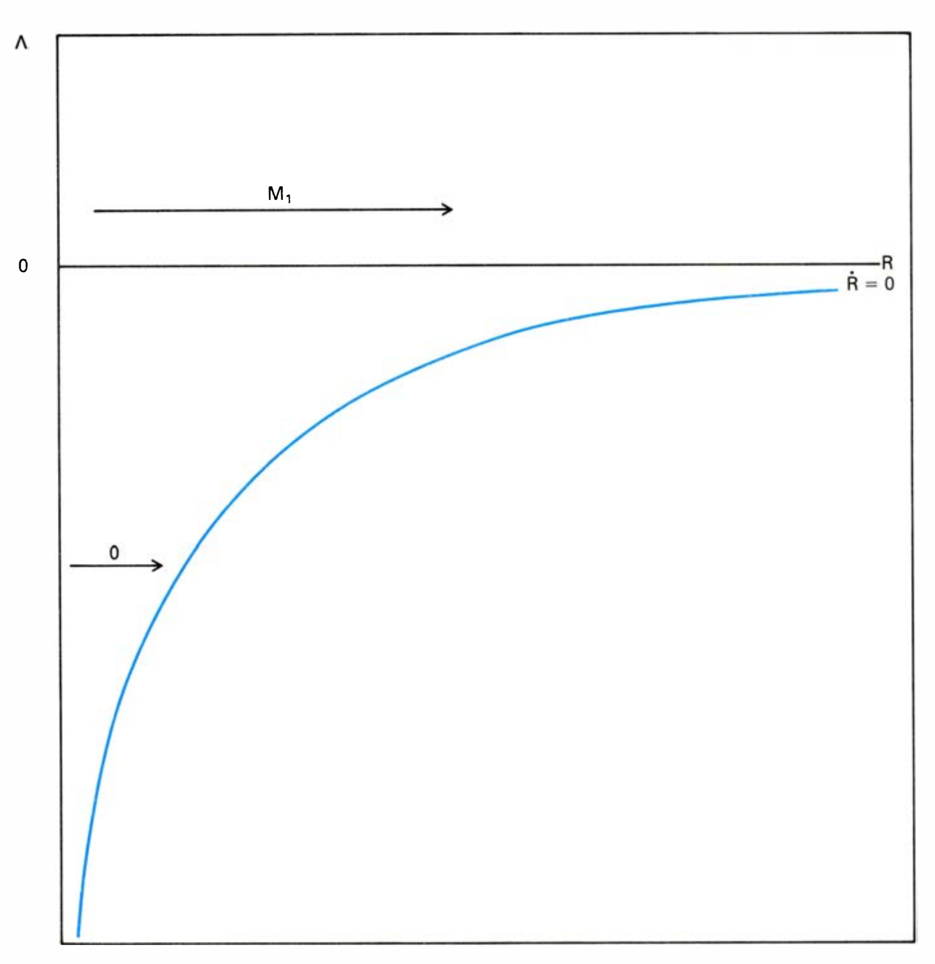
Hay que señalar que la idea de la expansión del Universo así entronizada en la cosmología no fue aceptada de



MODELOS COSMOLOGICOS para $k = +1$ en el plano (R, Λ), siendo R el factor de escala y Λ la constante cosmológica. k es una constante conectada con la curvatura espacial. Λ_E y R_E son los valores correspondientes para el modelo estático de Einstein y corresponden al máximo de la curva $\dot{R} = 0$. Para $\Lambda > \Lambda_E$ tenemos los modelos tipo M_1: comienzan en $R = 0$ (explosión inicial) y continúan en expansión sin fin. Para $\Lambda = \Lambda_E$ puede ocurrir que $R = R_E$; y entonces estamos en el modelo de Einstein, estático. Pero si $R < R_E$ tenemos el modelo A_1: comienza con explosión y se acerca asintóticamente al caso estático. Por el contrario, si $R > R_E$, el modelo correspondiente es el A_2: comienza sin explosión y se expande para siempre. Finalmente, para $\Lambda < \Lambda_E$, podemos encontrar modelos tipo 0, oscilantes (es decir, R va de $R = 0$ a un valor máximo y vuelve a $R = 0$ repetidamente) o en expansión eterna (M_2) sin explosión inicial.

inmediato y sin reservas por todo el mundo. El mismo Hubble, que mostró siempre una actitud muy escéptica frente a la idea de la expansión, escribía en su libro *Observational Approach to Cosmology* que la expansión sólo podía acomodarse a las observaciones forzándola; aunque, añadía, la no existencia de explicaciones alternativas justificaba en parte la aceptación de la idea. Pero la acumulación de datos sobre los desplazamientos hacia el rojo en las décadas siguientes se recibía como una confirmación de la teoría de la expansión.

Paralelamente, y sobre todo en los años cincuenta, se planteó la cuestión de la abundancia de los diferentes elementos químicos. Las observaciones de meteoritos caídos sobre la superficie terrestre y las determinaciones de abundancias en el Sol y en algunas estrellas próximas habían permitido establecer una relación de abundancia de las diferentes especies químicas, en función de la masa atómica de la especie considerada. Para intentar explicarlo se configuraron dos líneas de trabajo diferentes, que acabarían por complementarse. Mientras unos buscaron el origen de los elementos en los fenómenos que ocurren en los interiores estelares, los otros lo indagaron en un pasado caliente y denso del Universo. De todos esos trabajos, se desprenden dos consecuencias capitales: por un lado, las reacciones termonucleares que se desarrollan en los interiores de las estrellas permiten comprender razonablemente bien los mecanismos de formación de los elementos más abundantes, con excepción del helio y del deuterio. Por otro, G. Gamow y sus colaboradores encuentran la explicación para esos dos elementos hipotetizando un estado pasado del Universo de gran densidad y temperatura. Este notable cuadro general explicativo de los más destacados rasgos empíricos de la abundancia de los elementos químicos encierra una previsión importante, que por el momento pasará desapercibida: la de la existencia de una radiación térmica de fondo, testigo de aquellos especiales momentos de la vida del Universo, y especie de fósil que nos informaría de las condiciones pasadas. Las previsiones de Gamow sobre la temperatura actual de esa radiación térmica se sitúan entre 15 y 40 grados K.



MODELOS COSMOLOGICOS para $k = -1$ o 0 en el plano (R, Λ). Sólo hay dos posibilidades, ambas con comienzo explosivo: tipo M_1 si la llamada constante cosmológica $\Lambda \geq 0$ (expansión ininterrumpida) y tipo *O* cuando $\Lambda < 0$ con expansiones y contracciones sucesivas entre $R = 0$ y un valor máximo R_M.

El descubrimiento casual por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson de un extraño ruido en su antena receptora y la interpretación de Roll, Dickinson y Peebles de ese ruido como la radiación de fondo a la longitud de onda en que se medía, y correspondiente a un cuerpo negro a unos 3 grados K, supuso la casi unánime adhesión de los astrónomos a la teoría de la expansión, considerada válida incluso en la tremenda extrapolación hacia el pasado que supone llegar hasta densidades y temperaturas casi infinitas. (Roll y Dickinson estaban preparando ex-profeso una observación para intentar poner de manifiesto la radiación predicha por Gamow cuando Penzias y Wilson publicaron el resultado de sus medidas.) La teoría del átomo primitivo del abad Lemaître se veía así con los honores de la aceptación casi universal; sólo que bajo el nombre humorístico de "big bang" que Hoyle le diera.

La aceptación e importancia de la nueva cosmología trasciende el mundo de los astrónomos, llenándose de connotaciones filosóficas y religiosas, que van a dificultar en parte el análisis crítico de las hipótesis subyacentes. Así en 1951, el Pontífice Romano se dirige a los astrónomos y a la academia pontificia en los términos siguientes: "No puede negarse que un espíritu iluminado y enriquecido por los conocimientos científicos modernos y que contempla con seriedad este problema, se ve conducido a romper el círculo de una materia independiente y autónoma ya sea increada o creada por sí misma y a remontarse hasta un espíritu creador. Con el mismo ánimo límpido y crítico con el que examina y juzga los hechos, entrevé y reconoce la obra creadora del Todopoderoso, cuya virtud, suscitada por el poderoso 'fiat' pronunciado hace miles de millones de años por el Espíritu creador, se ha extendido por el universo, llamando a la existencia, en un gesto de generoso amor, a la materia desbordante de energía. Parece, en verdad, que la ciencia de hoy, remontándose en millones de siglos, haya conseguido convertirse en el testigo de aquél 'Fiat lux' inicial, de aquel instante en el que de la nada surgió, con la materia, un océano de luz y de radiaciones, mientras que las partículas de los elementos químicos se separaban y se ensamblaban en millones de galaxias".

Este resumen de la teoría de la expansión sigue siendo suscrito por los más eminentes astrónomos. Citemos así las palabras de conclusión de A. Sandage contenidas en un libro colecti-

vo sobre las galaxias y el Universo (*Stars and Stellar Systems,* vol. IX, "Galaxies and the Universe", pág. 783. The University of Chicago Press, Chicago 1975): "Los resultados actuales sugieren que no hay contradicción entre la edad de nuestra galaxia y el tiempo transcurrido en un universo de Friedmann desde la gran explosión inicial. Considerando la evidente evolución del Universo junto a otros hechos como la identidad entre la edad de las galaxias y de los elementos químicos con la de aquél, o la existencia de un límite más allá del cual no puede remontarse el nacimiento de los quasars observados, se hace coherente la concepción según la cual tuvo lugar una vez un acto de creación universal". De esta manera se desplaza a nuestro entender el problema fuera del contexto puramente astronómico y científico, lo que puede suponer la aparición de problemas para el desarrollo de nuevas concepciones.

Los modelos cosmológicos son simplemente familias de soluciones de las ecuaciones de Einstein, bajo ciertas hipótesis restrictivas. La primera de estas hipótesis se refiere al contenido material del Universo. Este se presenta muy complejo desde el punto de vista observacional, de modo que para representarlo se le considera como un fluido material continuo (el fluido cósmico) cuyas "moléculas" serían los cúmulos de galaxias. Lo cual significa que estos modelos sólo son válidos cuando se consideran las propiedades del Universo a muy gran escala.

Pero la hipótesis principal se refiere a la geometría del espacio-tiempo, hipótesis que se conoce como "principio cosmológico". Este establece que todas las posiciones espaciales del mismo son equivalentes, por lo que el universo aparece espacialmente homogéneo e isótropo. No en los detalles, naturalmente, sino cuando se consideran propiedades medias sobre elementos de volumen que pudieran tener de 10^8 a 10^9 años luz de dimensión característica.

Los primeros modelos cosmológicos formulados eran estáticos, es decir, las métricas correspondientes no dependían del tiempo. Pudo demostrarse que en estas condiciones sólo existían tres posibilidades. Una de ellas era el modelo plano de la relatividad restringida, mientras que las otras dos, los llamados modelos de Einstein y de Sitter, imponen un valor de la constante cosmológica necesariamente diferente de cero. El descubrimiento de la ley empírica de Hubble, y su inmediata interpretación como debida a la expansión, llevó a abandonar los modelos estáticos y a adoptar los desarrollados por Friedmann, los cuales, además de satisfacer las dos hipótesis antes mencionadas, tienen una métrica que varía con el tiempo. Se considera en este caso una nueva hipótesis que impone la existencia del llamado tiempo cósmico, a saber, un tiempo que puede ser definido para todo el Universo en cada instante. Geométricamente, esto significa que, en la variedad espacio-temporal de cuatro dimensiones, existe en cada instante una superficie tridimensional ortogonal a la dimensión temporal, que coincide con el Universo.

Λ	k	Ω_0	q_0	Tipo
> 0	> 0	0	< − 1	M_2; de Sitter
> 0	> 0	> 0, < Ω_c	< − 1	M_2; de Sitter
> 0	> 0	Ω_c	< − 1	A_2; caso de Lemaître de Sitter
> 0	> 0	> Ω_c	≤ − 1	M_1; de Sitter
> 0	> 0	> 0	$-1 < q_0 < 1/2$	M_1; de Sitter
> 0	> 0	> Ω_c	> 1/2	M_1; de Sitter
> 0	> 0	Ω_c	> 1/2	A_1; Einstein
> 0	> 0	< Ω_c	> 1/2	0
+ $1/c^2$	0	0	− 1	de Sitter
> 0	0	> 0	$-1 < q_0 < 1/2$	M_1; de Sitter
> 0	< 0	> 0	$-1 < q_0 < 1/2$	M_1; de Sitter
> 0	< 0	0	$-1 < q_0 < 0$	M_1; de Sitter
0	> 0	> 0	> 1/2	0
0	0	1/2	1/2	M_1; caso Einstein - de Sitter
0	< 0	> 0	$0 < q_0 < 1/2$	M_1
0	< 0	0	0	M_1; caso de Milne
< 0	> 0	> 0	> 1/2	0
< 0	0	> 0	> 1/2	0
< 0	< 0	0	> 0	0
< 0	< 0	> 0	> 0	0
> 0	> 0	$\Omega_c = \infty$	∞	Einstein

MODELOS RELATIVISTAS según los valores de los parámetros cosmológicos. Los principales parámetros son la constante cosmológica, Λ, el parámetro de densidad, Ω_0, y el parámetro de deceleración, q_0.

A partir de las ecuaciones de Einstein, tal como se expresan en el primer recuadro, H. P. Robertson pudo en 1933 establecer una clasificación de los modelos cosmológicos que de ellas podían deducirse. Para ello analizó el comportamiento de un factor de escala del que dependían las variaciones de distancia: la función *R (t)* –en el caso de presión nula–. Llamando Λ_E y R_E a los valores de la constante cosmológica y del radio del universo estático de Einstein, se encuentran los siguientes tipos de modelos. Primero: cuando la constante que expresa la relación entre *R (t)* y la curvatura tridimensional es igual a más uno: $k = +1$. La curva R tiene entonces un máximo en el punto (R_E, Λ_E). Puede ocurrir que Λ sea mayor, igual o menor que Λ_E. En la primera posibilidad, nos hallaremos con un universo monótomo de primera especie, M_1. Se inscriben aquí los modelos explosivos con expansión sin fin.

Cuando $\Lambda = \Lambda_E$, se presentan tres casos. Si $R < R_E$, tendremos un universo asintótico de primera especie, A_1 explosivo, se acerca asintóticamente al modelo estático de Einstein. Si $R = R_E$, se trata del modelo de Einstein. Finalmente, si $R > R_E$, tendremos un universo asintótico de segunda especie, A_2; éste comienza asintóticamente como el de Einstein para entrar en expansión. Si, en tercer lugar, $\Lambda < \Lambda_E$, y se cumple además que $R > R_E$, nos encontraremos ante universos monótonos de segunda especie, M_2. Por último, cuan-

do $\Lambda < \Lambda_E$ y se cumple que $R < R_E$, los universos resultantes serán oscilantes, 0; aunque de nacimiento explosivo, se expanden sólo hasta un máximo, recontrayéndose.

¿Qué ocurre cuando $k = -1$ o 0? Sólo hay dos posibilidades: $\Lambda \geq 0$, universo del tipo M_1; y $\Lambda < 0$, universo del tipo 0. Nótese que en el caso de tomar Λ igual a 0, sólo quedan dos posibilidades: tipo 0, con $k = +1$, o tipo M_1, con $k = -1$ o 0. Es decir, en ambos casos un Universo con comienzo explosivo, ya sea único o repetitivo.

Esta clasificación, que ilustra perfectamente las distintas posibilidades que ofrece la métrica con la hipótesis de fluido perfecto, no es sin embargo muy útil a la hora de buscar contrapartidas observacionales que permitan analizar cuál es el modelo más adecuado. Por ello, se estableció una clasificación en función de los llamados parámetros cosmológicos, que pueden ser en principio determinados empíricamente.

En el caso habitualmente considerado, $p = 0$, bastarán tres parámetros para individualizar cada uno de los modelos. Si además se considera el caso particular $\Lambda = 0$, ya no habrá necesidad más que de dos parámetros independientes, de modo que el universo será cerrado o abierto según sea q_0 mayor que 1/2 o menor (o igual) que 1/2.

La ilustración de la página precedente reproduce todas las posibles familias de modelos de universo que tienen una métrica tetradimensional determinada. Algunas de estas familias contienen singularidades, ya sea únicas (en el pasado) o repetitivas (en el pasado y en el futuro). En estos casos, si se admite, como usualmente se hace, que la fase actual es de expansión, la extrapolación hacia el pasado corresponde a estados cada vez más densos y calientes del universo, hasta llegar al "instante inicial" (singular) de la gran explosión: estado de densidad y temperatura infinitas. Dado que el instante mismo del inicio de la gran explosión se presenta como inabordable desde el punto de vista de la física, el relato científico comienza algunos instantes después.

Según la teoría ortodoxa, estos primeros momentos se caracterizan por una situación en la que dominan las interacciones fuertes (era hadrónica) con temperatura superior a los 10^{12} grados K y densidad superior a los 10^{14} gramos por centímetro cúbico. Esta etapa habría durado los primeros 10^{-4} segundos. A medida que la temperatura va descendiendo, a causa de la expansión,

Relatividad General

La Relatividad General considera el espacio-tiempo como una variedad riemanniana, cuyo invariante fundamental viene dado por

$$ds^2 = g_{\mu\nu}\, dx^\mu\, dx^\nu \qquad (1)$$

$$\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$$

donde $G_{\mu\nu}$, el tensor métrico, representa los potenciales de gravitación.

Las ecuaciones de Einstein se escriben

$$G_{\mu\nu} = \chi\, T_{\mu\nu} \qquad (2)$$

donde $G_{\mu\nu}$, llamado tensor de Einstein, contiene la parte geométrica, y $T_{\mu\nu}$ representa el contenido material a explicitar en cada caso; χ es una constante. Como Cartan demostró, la forma más general de $G_{\mu\nu}$, bajo las condiciones de conservación de energía y que la aproximación de primer orden de (1) sean precisamente las ecuaciones de la mecánica de Newton, es

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} G_{\mu\nu} (R - 2\,\Lambda) \qquad (3)$$

donde $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci de la variedad, R la curvatura escalar y Λ, una constante llamada cosmológica. Desde este punto de vista, adoptar un valor determinado para Λ es restringuir la teoría, aunque las observaciones indican que Λ podría ser nula.

La forma que se adopta en general en cosmología para el tensor material, $T_{\mu\nu}$, es la correspondiente a un fluido perfecto:

$$T_{\mu\nu} = (\rho\, c^2 + p)\, U_\mu U_\nu - p\, G_{\mu\nu} \quad (4)$$

donde ρ es la densidad en reposo de la partícula fluida, c es la velocidad de la luz, p la presión y U_μ la cuadrivelocidad,

$$U_\mu = \frac{dx^\mu}{ds}$$

Ecuaciones de los modelos cosmológios ortodoxos

Para obtenerlas se parte de las ecuaciones de Einstein, con $T_{\mu\nu}$ correspondiente a un fluido perfecto, y $G_{\mu\nu}$ deducido de la siguiente métrica en coordenadas cilíndricas

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2\,(d\theta^2 + sen^2\theta\, d\varnothing^2) \right] \qquad (1)$$

donde $R(t)$ es el llamado factor de escala y k es una constante conectada con la curvatura espacial, que puede valer $\pm$ 1 o 0.

Para explicitar la conexión entre desplazamientos hacia el rojo y expansión, se considera la propagación de la luz, es decir, $ds^2 = 0$. Entonces:

$$\frac{dt^2}{R^2(t)} = \frac{dr^2}{1-kr^2} \qquad (2)$$

Considerando el observador en $(0, t_0)$ y la fuente luminosa en (r_1, t_1) la relación entre frecuencia emitida y frecuencia recibida será:

$$\frac{\nu_1}{\nu_0} = \frac{\delta t_0}{\delta t_1} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} \equiv \frac{R_0}{R_1} \qquad (3)$$

y el desplazamiento espectral

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{R_0}{R_1} - 1 \qquad (4)$$

Dado que $z > 0$ para todos los casos, se deduce que $R_0 > R_1$, es decir, el universo se expande.

Las ecuaciones de Einstein se escriben explícitamente:

$$8\,\pi\, p = -\frac{k}{R^2} - \frac{\dot{R}^2}{R^2} - 2\frac{\ddot{R}}{R} + 1$$

$$\frac{8}{3}\,\pi\,\rho = \frac{k}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{\Lambda}{3}$$

$$\rho R^3 = cte$$

donde el punto expresa la derivación con respecto al tiempo.

comienzan a hacerse presente los leptones, quienes van a dominar mientras la temperatura vaya bajando de los 10^{12} grados K hasta los 10^{9} grados K (era leptónica). Llegados a este punto, los pares electrón-positrón se aniquilarían más deprisa de lo que se forman, entrándose de esta forma en la era radiativa, así llamada por ser los fotones la componente dominante del fluido cosmológico. Mientras que la era leptónica se acabaría cuando apenas hubo transcurrido 4 segundos de la vida del universo, la radiativa habría llegado hasta los 10^{14} segundos, es decir, del orden del millón de años. Durante esta etapa, y cuando habían transcurrido 200 segundos de la vida del universo, se habría producido la síntesis del llamado helio primordial, y que actualmente se observa como una sobreabundancia de este elemento con respecto a lo que los mecanismos conocidos de síntesis del He pueden producir.

Finalmente cuando la temperatura alcanzó valores tan bajos como 3000 grados Kelvin, las partículas elementales más abundantes, protones y electrones, comenzaron a recombinarse apareciendo los átomos de hidrógeno y helio; en el balance energético comenzaba a dominar la materia en forma habitual sobre la radiación, cerrándose la etapa digamos infantil del Universo. Sin energía suficiente ya para mantenerse en mutuo equilibrio, materia y radiación se desacoplan siguiendo cada uno por su lado la posterior evolución. La materia comenzaría a formar enormes conglomerados que hoy conocemos como galaxias, mientras que la radiación seguía enfriándose, aunque, y esto es esencial en la cosmología dominante, conservando su carácter de cuerpo negro. Esta radiación sería la que hoy observamos como radiación de fondo a unos tres grados Kelvin, especie de fósil de aquel pasado extremadamente caliente de Universo, enfriado desde temperaturas infinitas hasta las proximidades del cero absoluto.

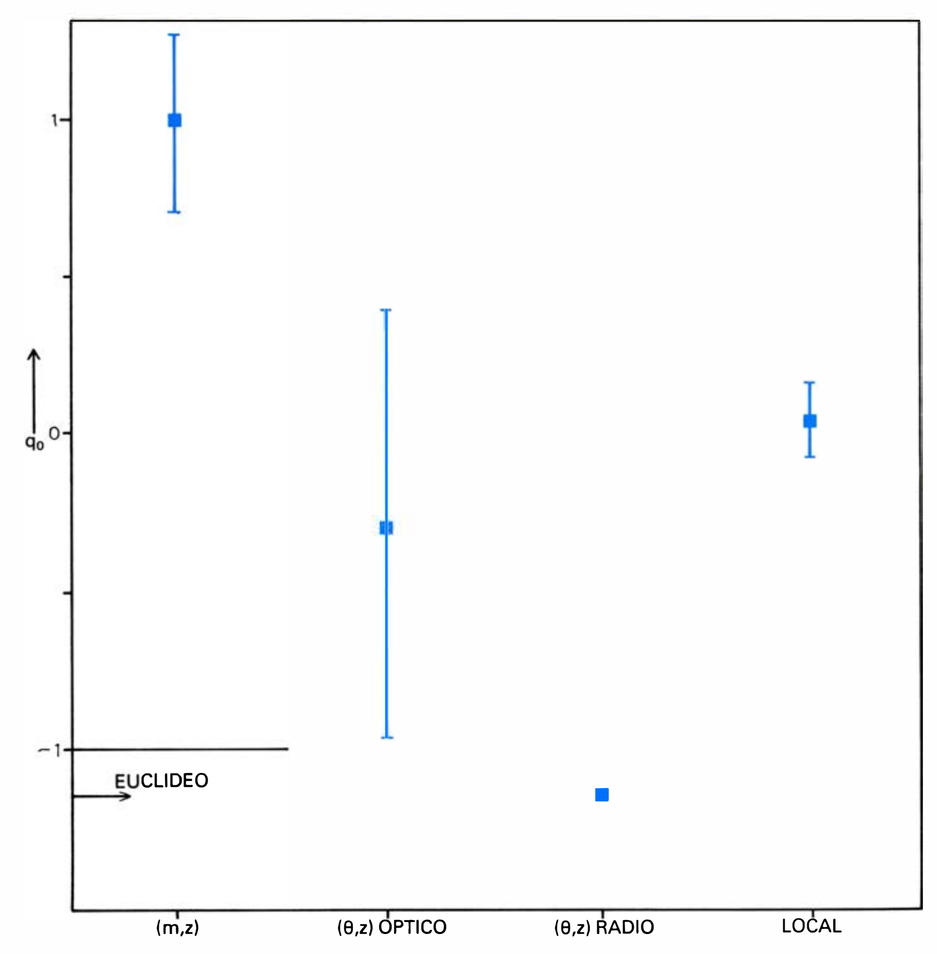
En este fascinante esquema explicativo, quedaría de esta manera integrado el fenómeno del desplazamiento hacia el rojo, así como el misterio de la abundancia del helio y la existencia de la radiación planckiana de fondo. Y la única tarea por hacer sería, pues, la determinación observacional de los parámetros cosmológicos (en principio sólo dos si se da como nula la constante cosmológica) que fijaría para siempre el modelo de universo que corresponde a la realidad. Programa que ha motivado los más importantes trabajos de las dos últimas décadas.

Para completar el esquema quedarían por resolver problemas que para la mayoría de astrónomos no son más que técnicos y entre ellos el de la formación de las galaxias. Pero con esta salvedad considerada en general como de carácter no esencial, la cosmología podría darse, según los cosmólogos actuales, por fundamentalmente ultimada, a la espera de refinamientos tanto en el terreno de las observaciones como en el teórico.

Sin embargo, este magnífico fresco de la ciencia de la segunda mitad del siglo XX no aparece tan firmemente sostenido por los hechos observacionales como sería de desear; hechos que en muchos casos se resisten a entrar en este marco teórico, o que lo hacen con violencia, forzados por métodos de análisis que pueden resultar criticables.

El modelo expansionista del universo aparece en principio como un todo coherente, tanto desde el punto de vista teórico como desde el observacional: la expansión explicaría el desplazamiento hacia el rojo y la gran explosión sería la causa de la sobreabundancia de He y de la existencia de la radiación de fondo. Pero un análisis crítico del mismo muestra la existencia de problemas y ambigüedades, que sin que hasta hoy sean suficientes para destruirlo, sí al menos justifican el replanteamiento del problema en su conjunto y desde sus presupuestos iniciales; así como la realización de nuevas y sistemáticas observaciones, tan escasas en este dominio.

Comencemos por el llamado principio cosmológico. Astrónomos como Fred Hoyle, T. Gold y H. Bondi se plantearon la cuestión del principio cosmológico en sus aspectos teóricos. En efecto, el establecimiento de la homogeneidad e isotropía exclusivamente espaciales discrimina la variable temporal, lo que no aparece muy conforme con el espíritu de la teoría de la relatividad. Quizá resulte aquí interesante recordar cómo P. Dirac, en el dominio de la relatividad especial, partiendo entre otras consideraciones de la necesidad de tratar la variable tiempo exactamente de la misma manera que las espaciales, obtuvo las ecuaciones relativistas del electrón. De la misma manera, los autores antes citados formularon el llamado "principio cosmológico perfecto", que establece la homogeneidad e



VALORES DEL parámetro de deceleración, q_0, en función del método para su determinación. Las barras indican la dispersión. La disparidad refleja una dependencia entre el valor encontrado y el método.

isotropía tanto espacial como temporal. Y puesto que admitían que el Universo está en expansión, ese principio implica la creación continua de materia "ex nihilo" para que el universo pueda conservar sus características globales a pesar de la expansión.

Este modelo está hoy abandonado por las insalvables dificultades encontradas a la hora de explicar el origen de la radiación de fondo, así como por el rechazo de la idea de creación continua, por parte de quienes aceptan, sin embargo, la creación en un instante. En cualquier caso, el abandono del modelo no destruye la fuerza de las críticas emitidas contra el principio cosmológico habitual, ni los argumentos que llevaron a su formulación.

Desde el punto de vista observacional se plantean también algunos problemas con respecto a la homogeneidad e isotropía del universo. Los recuentos de galaxias realizados hasta la fecha muestran de manera inequívoca que éstas se distribuyen de modo no uniforme, presentándose en grupos de mayor o menor importancia. La cuestión que hay que responder es, pues, a qué escala podemos considerar el universo homogéneo e isótropo; en otras palabras: cuál es el tamaño de la "molécula" del fluido cosmológico. Existen los cúmulos de galaxias, llamados cúmulos de primer orden, que contienen decenas o centenares de galaxias; también se acepta de manera general la existencia de cúmulos de segundo orden, supercúmulos, que encierran varios miles de galaxias. Nuestra galaxia pertenece, por ejemplo, al Grupo Local, que contiene algo más de 20 galaxias, Andrómeda entre ellas; a su vez, el Grupo Local, junto con otras tres o cuatro mil galaxias, pertenece al Supercúmulo Local, cuya parte central está constituida por el cúmulo de la Virgen. La dimensión típica de un supercúmulo como el nuestro es de unos 30-50 megaparsec (1 megaparsec equivale a 3×10^{24} centímetros).

En cuanto a la existencia de cúmulos de orden superior, las observaciones no permiten establecerla con claridad, ya que se carece por el momento de recuentos que lleguen suficientemente lejos. Razón por la que algunos autores admiten su existencia, mientras que otros la niegan. En todo caso, lo que sí puede afirmarse es que hasta donde las observaciones de que se disponen nos permiten llegar no hay ningún indicio de homogeneidad o isotropía en la distribución de las galaxias; de tal manera que el conjeturar que esas propiedades van a darse a una mayor escala no pasa de ser una hipótesis, quizás un deseo, que no está por el momento confirmado. Argumentar, como a veces se hace, que la homogeneidad e isotropía del universo queda probada por la de la radiación de fondo no demuestra nada, puesto que se le da a esa radiación un significado cosmológico que está por probar.

Por otro lado, si se aceptan que no existen cúmulos de orden superior al segundo, esto significa que el principio cosmológico, y, por tanto, los modelos que de él se derivan, no pueden aplicarse más que a escalas superiores a la del

Parámetros cosmológicos

Se introducen para caracterizar más fácilmente los diferentes modelos. Los principales son la constante cosmológica, Λ, la constante de Hubble, H_0, el parámetro de deceleración, q_0, y el de curvatura. La primera y el último ya han sido introducidos, y los otros dos aparecen cuando se explicita la relación entre la distancia y el desplazamiento hacia el rojo.

Aunque en Relatividad General no hay una única definición de distancia, la más utilizada por los astrónomos es la llamada distancia-luminosidad, dada por:

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4 \pi l}} \qquad (1)$$

donde L es la luminosidad intrínseca y l la recibida; d_L puede expresarse así:

$$d_L = R_0^2 \frac{r_1}{R_1} = r_1 R_0 (1 + z) \qquad (2)$$

Desarrollando $R(t)$ alrededor de R_0 se obtiene:

$$R(t) = R_0 \left[1 + \frac{\dot{R}_0}{R_0}(t - t_0) + \right.$$
$$\left. + \frac{R_0}{2 R_0}(t - t_0)^2 + \ldots\right] \qquad (3)$$

Definiendo

$$H_0 = \frac{\dot{R}_0}{R_0} \qquad (4)$$

$$q_0 = \frac{\ddot{R}_0 R_0}{\dot{R}_0^2} \qquad (5)$$

se obtiene

$$d_L = \frac{1}{H_0}\left[z + \frac{1}{2}(1 - q_0) z^2 + \ldots\right] \qquad (6)$$

Además, de H_0, q_0 y Λ se consideran otros parámetros cosmológicos:

–Parámetro de densidad:

$$\Omega_0 = \frac{8 \pi G}{3 H_o^2} \rho_{-} \equiv \frac{\rho_0}{\rho_c} \qquad (7)$$

donde $$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G}$$

se conoce como densidad crítica por ser el valor frontera entre los modelos cerrados y los abiertos. G es la constante de Newton.

–Parámetro de presión:

$$\varepsilon = p/\rho \qquad (8)$$

que se toma generalmente como nulo.

–Parámetro de tiempo, T, definido por

$$T = H_0 \cdot t \qquad (9)$$

donde t es el tiempo transcurrido desde el tiempo de la expansión. Cuando $p = 0$ resulta:

$$T = \int_0^1 \frac{dy}{\sqrt{\left(\frac{\Omega}{2} - q\right) y^2 + \Omega y^{-1} + q + 1 - \frac{3}{2}\,\Omega}} \qquad (10)$$

Estos parámetros no son todos independientes, y para $p = 0$, bastan tres para individualizar cada uno de los modelos.

Como relaciones más interesantes entre parámetros tenemos (con $p = 0$)

$$\Lambda = -3 H^2 \left(q - \frac{\Omega}{2}\right) \qquad (11)$$

$$kc^2 = H^2 R^2 \left(\frac{3}{2}\Omega - q - 1\right) \qquad (12)$$

En el caso, habitual, de tomar $\Lambda = 0$ tendremos:

$$q = \frac{\Omega}{Z} \qquad (13)$$

$$k = \frac{H^2 R^2}{c^2}(2q - 1)$$

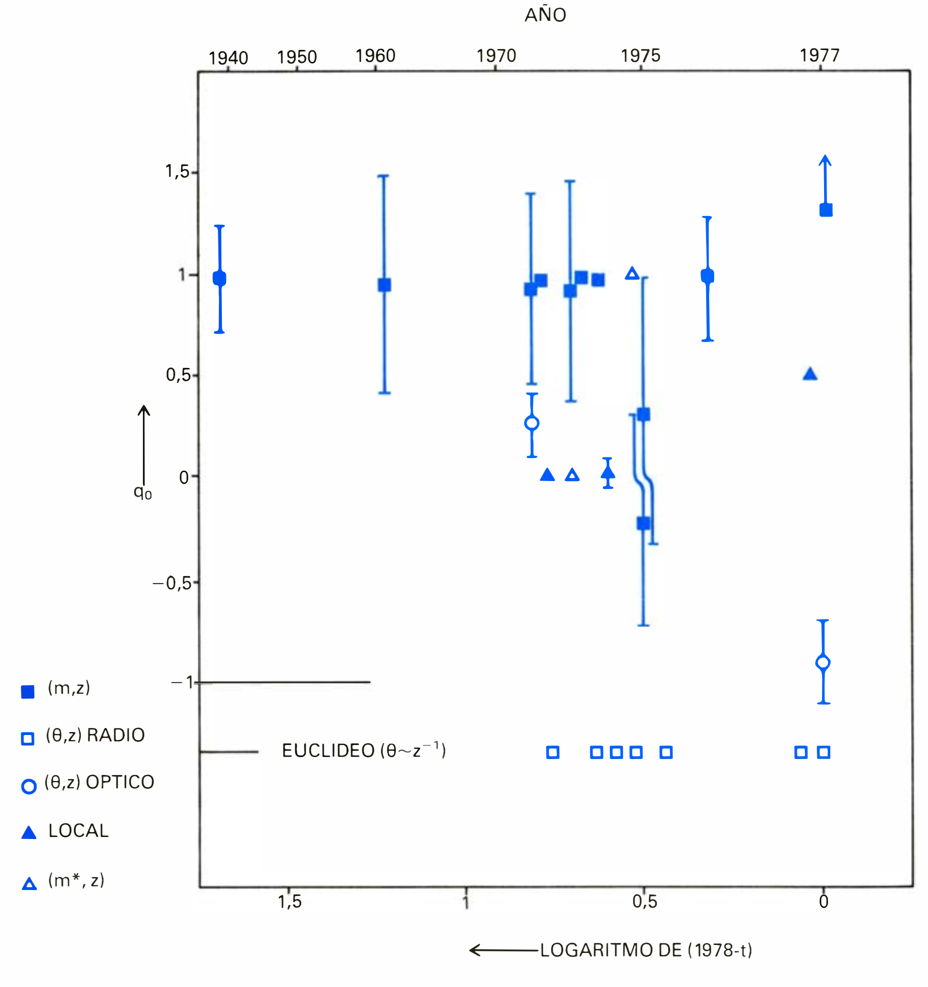
y sólo habrá dos parámetros independientes, H_0 y q_0 por ejemplo.

supercúmulo, el cual constituiría el componente básico o "molécula" del fluido cosmológico. En consecuencia, los modelos cosmológicos sólo serán aplicables a esas mismas escalas.

Ahora bien, la ley de Hubble y su explicación expansionista son estudiadas y confirmadas dentro de los supercúmulos, con lo que las consecuencias de un cierto modelo serían válidas incluso más allá de los límites de validez de la hipótesis subyacentes. Aunque puedan buscarse explicaciones más o menos adaptadas, no deja de constituir una situación paradójica. Por el contrario, y como ya Zwicky expusiera en 1929, si el fenómeno del desplazamiento hacia el rojo no se debe a propiedades globales de la geometría del espacio-tiempo, sino que es un fenómeno físico que hace intervenir a los fotones, este fenómeno se manifestará no sólo a gran escala, sino también a escala de galaxias individuales, e incluso a escala de estrellas. Y, por supuesto, a nivel de laboratorio. ¿Qué decir de los valores observacionales de los parámetros cosmológicos? Continuando con los planteamientos de la cosmología standard, el problema sería el de la determinación de esos parámetros; problema a cuya resolución se han dedicado grandes esfuerzos, con resultados más bien decepcionantes. Así, con la constante de Hubble, H_0. Esta traduce en los modelos cosmológicos el valor del desplazamiento hacia el rojo por unidad de distancia. Dado que la hipótesis expansionista manifiesta que el desplazamiento hacia el rojo es independiente de todo parámetro, excepto de la distancia entre el objeto considerado y el observador, de acuerdo con estos modelos H_0 debería tener un valor observacional único y bien definido. Luego nos ocuparemos de la cuestión de la dependencia del desplazamiento hacia el rojo de otros parámetros y su influencia sobre el valor de H_0; pero en cuanto el valor mismo de la constante, hay que señalar la existencia de una fuerte controversia entre los especialistas.

Antes de dar los valores que actualmente se adoptan, quisiéramos evocar brevemente la corta historia del valor observacional de H_0, que nos parece muy ilustrativa. El valor encontrado en su trabajo original por Hubble era de 500 kilómetros por segundo y por megaparsec; valor confirmado por Hubble y Humason en posteriores trabajos. Por los años 50, Baade introdujo una recalibración de las variables cefeidas, utilizadas como indicadores de distancia, que redujo el valor de H_0 a 260 kilómetros por segundo y por megaparsec. Los continuadores de Hubble (Humason, Mayall y Sandage), a partir de nuevos datos, redujeron el valor de la constante a 180 kilómetros por segundo y por megaparsec. Sandage, sin duda el astrónomo que más ha trabajado sobre esta cuestión, volvió a revisar sus criterios de distancia (que, repitámoslo, constituye el principal problema en el dominio extragaláctico) dando el valor, primero, de 75 y, luego, de 98 kilómetros por segundo y por megaparsec para H_0. Esto ocurría al principio de los años 60.

Posteriores esfuerzos nos han llevado a una situación en la que se asignan de manera irreconciliable dos valores diferentes a H_0. Por un lado, Sandage y Tammann concluyen que el valor de H_0 es de unos 50 kilómetros por segundo y megaparsec; valor curiosamente aceptado por la comunidad astronómica en general, mientras que el resto de los especialistas de la cuestión apuntan valores de la constante de Hubble próximos a 90-100 kilómetros por segundo y megaparsec. En principio, ambos valores no aparecen demasiado distantes. Podría pensarse, pues, que la media de ambos puede ajustarse adecuadamente al valor real. Sin embargo, hay que señalar que, tomados en su conjunto, los valores observacionales de H_0 tienen una distribución bimodal de tal forma que esa pretendida media carece de sentido. En suma, aún asumiendo de entrada la existencia de un parámetro observacional correspondiente a la constante que aparece en las ecuaciones cosmológicas, las estimaciones empíricas no permiten por el momento concluir ni sobre su unicidad ni por supuesto sobre su valor concreto. Veamos qué ocurre con el parámetro de deceleración, q_0. Para estimar el estado empírico de la cosmología, la estimación del valor de q_0 y su comparación con las previsiones teóricas es de primera importancia. La determinación del parámetro de deceleración se ha llevado a cabo por varios métodos, basados todos en las relaciones teóricas que conectan diferentes parámetros observacionales; además de los clásicos [relaciones entre la magnitud aparente y el



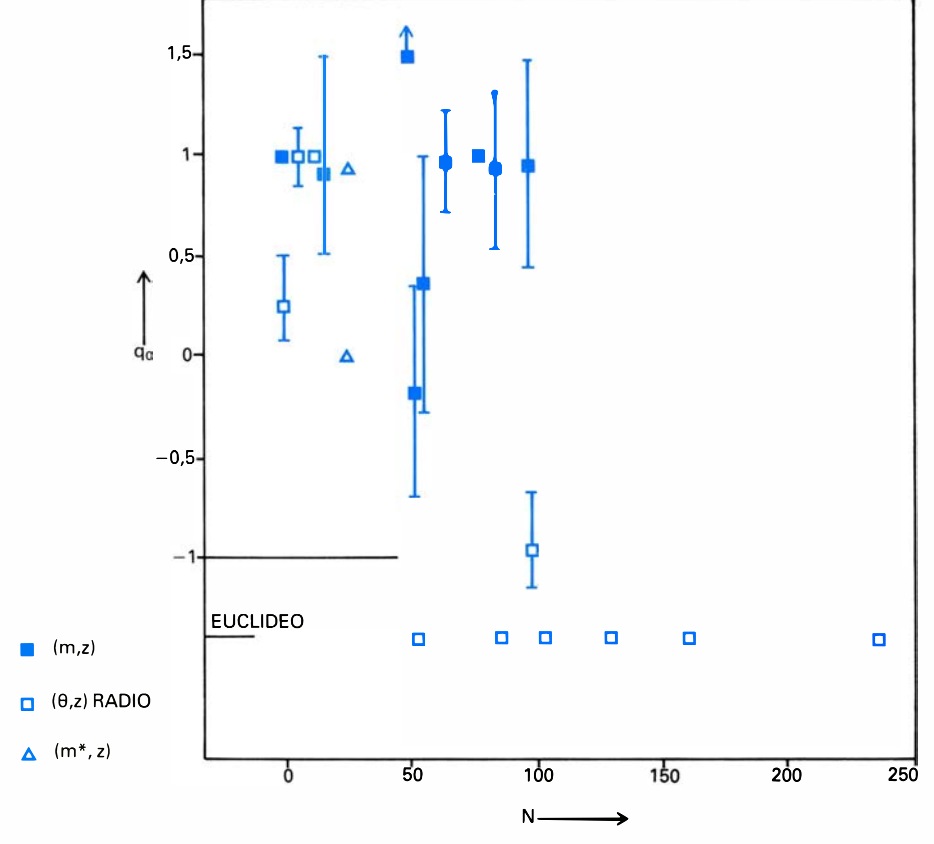
VALORES DE q_0 según el año de su publicación y el método empleado. En principio se espera que el progreso de la técnica lleve a medidas cada vez más precisas y que la serie de resultados vaya convergiendo hacia su valor real. Sin embargo, la figura muestra que no es así en el caso del parámetro de deceleración.

desplazamiento hacia el rojo (m,z); o entre el diámetro angular aparente y el desplazamiento hacia el rojo, (θ,z)], existen los que podríamos llamar métodos locales, que se basan en la observación de propiedades del Universo a escala local. Así, la no uniformidad de densidad que representa el Supercúmulo Local debería repercutir en un eventual frenado de la expansión en su interior, lo cual, a través de la relación entre el parámetro de deceleración y de densidad, nos llevaría a conocer q_0.

En principio, y partiendo de la hipótesis de que q_0 es la traducción matemática de un parámetro físicamente bien definido, cabe pensar que la dispersión de valores empíricos obtenidos por diferentes métodos va a ir disminuyendo a medida que la cantidad y la calidad de los datos de observación aumenten, lo cual debería implicar que los distintos valores van convergiendo hacia el valor real del parámetro. La realidad señala, empero, lo contrario. Pudiéndose concluir que el valor que se obtiene depende del método y de la muestra utilizada. Situación que nos parece grave, hasta el punto de que, de persistir en el futuro, la teoría que subyace a la noción del parámetro de deceleración se vería comprometida.

A veces se pretende interpretar estos resultados invocando los efectos de evolución que entran en juego a medida que se comparan galaxias cada vez más alejadas. Sin embargo, los recuentos parciales de galaxias hasta la magnitud 24 descartan todo efecto de evolución apreciable. Además, hay encerrado en este tipo de argumentos un verdadero dilema que suele conducir a razonamientos circulares. En efecto, estos tests cosmológicos exigen la comparación de objetos intrínsecamente semejantes, situados a diferentes distancias, mientras que la teoría que los motiva no sólo predice una evolución global del Universo, sino también de las propiedades medias de las galaxias. No pueden así invocarse efectos evolutivos para acomodar las discrepancias encontradas en la determinación de los parámetros cosmológicos, si esos efectos de evolución no han sido determinados antes por métodos totalmente independientes de la teoría cosmológica, so pena de caer en un razonamiento circular que nada prueba. En otras palabras, no puede pretenderse extraer un modelo cosmológico de las observaciones sobre la evolución de las galaxias, sino que, por el contrario, la evolución de éstas debe encuadrarse en un universo cuya estructura global se haya dilucidado de manera independiente. En cuanto a otros parámetros como t, Ω_0, la situación es parecida, y no nos detendremos aquí.

En definitiva, el primer problema a resolver desde el punto de vista observacional es el de la naturaleza del desplazamiento hacia el rojo, para determinar si es un fenómeno debido a la expansión o no. Aunque pueda parecer paradójico, la hipótesis de la expansión del universo ha sido aceptada desde hace más de 50 años sin que se hayan realizado estudios observacionales sistemáticos sobre esta cuestión. En efecto, una vez que se constató la existencia de una relación aproximadamente lineal entre la magnitud aparente y el logaritmo de la velocidad radial correspondiente al desplazamiento hacia el rojo observado, no se continuó investigando esa relación y sus posibles desviaciones, sino que se atacó directamente la cuestión del valor observacional de la constante de Hubble. Para estimarlo, se comienza por aceptar que la expansión es la única explicación del fenómeno observado y se pasa luego a elaborar muestras de objetos que nos permitan determinar H_0. Para que estas muestras sean válidas tienen que ser homogéneas; y esta condición no sólo se refiere a ciertas características observacionales, sino que abarca también la exigencia de que los objetos que la componen constituyan una familia bien definida, con una misma magnitud absoluta, en particular. Dadas las incertidumbres sobre la distancia en el dominio extragaláctico, esta exigencia hace intervenir de manera más o menos directa la hipótesis de partida sobre la relación lineal entre el desplazamiento hacia el rojo, z, y la distancia; con lo que el razonamiento es parcialmente circular. Hasta el punto de que los objetos cuyas características observadas no se ajustan a la hipótesis de partida van a ser excluidos del análisis, dado que la hipótesis se considera válida de entrada y lo que se busca es simplemente el valor de la constante que caracteriza esa hipótesis, convertida ya en ley. Los casos que parecen entrar en conflicto con ella son rechazados bajo la sospecha (que en general no se intenta confirmar) de peculiaridades en sus propiedades, o poca destreza del observador.



VALORES DE q_0 según el número de objetos utilizados en el análisis. Se observa que, contrariamente a lo que cabe esperar, cuantos más objetos se utilizan, más alejados están los valores dados por los diferentes métodos. De esta ilustración y de las anteriores figuras podría deducirse que el valor favorecido por todas las determinaciones realizadas resulta ser el valor euclídeo, correspondiente a un universo estático.

Puntualicemos que la relación empírica (m,z) o ley de Hubble, en cuanto expresa una proporcionalidad en términos medios entre distancia y desplazamiento hacia el rojo, es un hecho de observación. No se trata de discutir so-

bre hechos comprobados, sino de analizar críticamente la interpretación que de ellos se hace. La ley de Hubble empírica es una relación promediada entre parámetros observados; la hipótesis de la expansión la eleva a ley rigurosa y absoluta, al postular que el desplazamiento hacia el rojo cosmológico (excepto las mínimas contribuciones debidas a los movimientos propios) depende exclusivamente de la distancia. Y en este sentido es en el que afirmamos que la hipótesis de la expansión no ha sido comprobada sólidamente.

Para analizar el problema desde el punto de vista observacional, el planteamiento es muy claro: se trata de estudiar las posibles variaciones del desplazamiento hacia el rojo en función de diferentes propiedades de los objetos, además de la distancia; o la posible influencia de la localización sobre la bóveda celeste de un objeto, sobre el valor de su desplazamiento hacia el rojo. Consideremos esa situación para distintos objetos. Empecemos por los quasars. Dadas las peculiaridades de estos objetos, suele considerárseles por separado, ya que su naturaleza continúa siendo un perfecto misterio. Desde su descubrimiento, se intentó realizar con ellos una serie de análisis de interés cosmológico, puesto que los grandes valores de z que exhibían les hacía en principio útiles no sólo para determinar H_0, sino para determinar también q_0. Por desgracia, pronto pudo comprobarse que el correspondiente diagrama (m, z) era un simple diagrama de dispersión, sin que de él pudiera sacarse ninguna conclusión relativa a las cuestiones cosmológicas. Por otro lado, si a los quasars se les asigna la distancia que su z indica, sus propiedades intrínsecas resultan tan extraordinarias que no es fácil imaginar las correspondientes explicaciones, e incluso producen paradojas de difícil solución por el momento.

Finalmente, existen casos en que dos quasars o un quasar y una galaxia aparecen en el cielo a distancias angulares muy pequeñas, dando lugar a pensar en una real asociación; sin embargo, los valores de los correspondientes desplazamientos hacia el rojo son muy diferentes, lo que en principio es contrario a la hipótesis expansionista. Naturalmente esa asociación podría no ser más que aparente, y el problema desaparecería. Pero lo que no parece correcto es admitir como reales aquellas asociaciones angulares que no contradicen la hipótesis expansionista y rechazar sin más las discordantes, utilizando para ello la hipótesis que se quiere probar.

Las galaxias permiten un análisis sistemático del desplazamiento hacia el rojo, por ser objetos de los que se conocen mucho mejor un buen número de características físicas. Además, son objetos considerados como normales con respecto a los quasars, por lo que los argumentos de peculiaridad invocados cuando se habla de quasars carecen aquí de valor. ¿Cuáles son las correlaciones entre el desplazamiento hacia el rojo y algunas propiedades físicas? En este caso, la metodología empleada es muy clara, y consiste en analizar la distribución de z para objetos situados a la misma distancia, en función de un parámetro físico. Para asegurarse que los objetos se hallan a la misma distancia, se escogen galaxias dinámicamente ligadas, por pertenecer al mismo grupo físico. Dado que en la definición de grupo se hace intervenir la noción de desplazamiento hacia el rojo, en el sentido de exigir que la dispersión de valores de z para los diferentes miembros del grupo sea pequeña, el análisis se sitúa en las condiciones más favorables al punto de vista de la expansión.

Con esas premisas, se ha podido comprobar la existencia de una correlación positiva entre el desplazamiento hacia el rojo y el tipo morfológico de las galaxias: las de tipo espiral intermedio presentan, en los casos estudiados, un exceso de z con relación a las otras. Posteriormente se ha realizado un estudio en el que se analiza el efecto combinado del tipo morfológico y emisividad en ondas radioeléctricas, que muestran que el mayor exceso se presenta para aquellas galaxias que son a la vez espirales y radioemisoras. Otra propiedad cuyo efecto sobre el desplazamiento hacia el rojo ha sido estudiada es la compacidad, encontrándose también un efecto positivo para las más compactas.

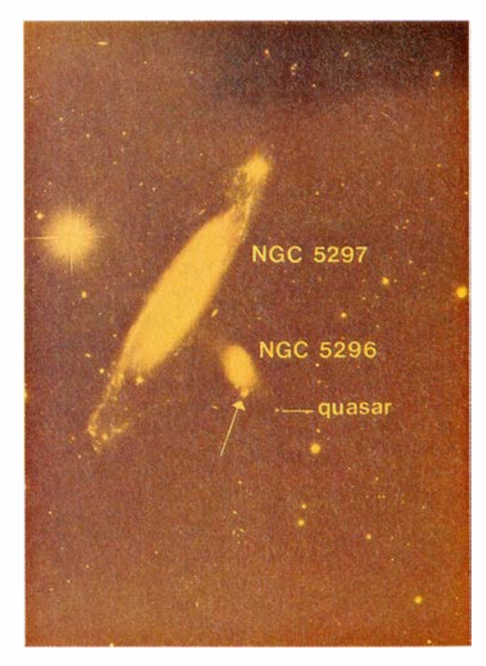
Cuando dos objetos aparecen próximos sobre una placa fotográfica de una región del cielo, la información sobre la posición relativa de esos objetos es ambigua, si no se dispone además de información sobre la distancia de cada uno de ellos al observador. El análisis del documento fotográfico puede en algunos casos permitirnos decidir si la asociación es real, es decir, los dos objetos están a la misma distancia del observador, o tan sólo aparente.

En la interpretación ortodoxa del desplazamiento hacia el rojo como dependiente exclusivamente de la distancia, está claro que dos objetos de valores de z diferentes no pueden estar a la misma distancia, por lo que esos casos suelen ser despreciados. Esta actitud restringe arbitrariamente todo análisis posterior del problema, y puede viciar por tanto las conclusiones. Queda aún por precisar lo que se entiende por asociaciones angulares, o imágenes "próximas". Para apreciar la importancia relativa de una separación angular, es necesario estimar la densidad numérica de los objetos considerados en la región del cielo que se está estudiando. De esta manera, se puede deducir la separación angular media y la probabilidad de que dos o más objetos aparezcan separados en menos de una cierta cantidad. Cuanto más débil es la densidad numérica más improbable es que dos objetos aparezcan asociados. De manera que si se da un número demasiado elevado de tales asociaciones, puede considerarse seriamente la posibilidad de que tales asociaciones sean reales.

Entre los casos más espectaculares de asociaciones posiblemente reales que no se acomodan a la hipótesis de la

METODO	$<q_0>$
(M,Z)	0,93 ± 0,19
(θ,Z), OPTICO	−0,30 ± 0,63
(θ,Z), RADIO	< − 1
LOCAL	0,03 ± 0,08

DISTINTOS VALORES del parámetro de deceleración q_0 según los distintos métodos utilizados.



PROXIMA A LA GALAXIA ESPIRAL NGC 5297, a velocidad simbólica de 2500 kilómetros por segundo, se halla NGC5296 (v = 2500 km/seg). Parte de ésta aparece oculta por un objetivo compacto de velocidad 25.000 km/seg que, a pesar de su desplazamiento hacia el rojo, parece encontrarse delante, esto es, más cerca que NGC5296.

expansión, podemos citar los cuatro siguientes. *Triplete de Zwicky:* el brazo de una galaxia (*cz* = 108 kilómetros por segundo) coincide con otras dos galaxias (*cz* = 7086 y 7304 kilómetros por segundo), siendo muy parecidas las luminosidades de los tres objetos. [*cz* representa la velocidad simbólica de desplazamiento.] *Cadena VV 172:* descubierta por Vorontsov-Velyaminov y estudiada por Sargent, está constituida por cinco galaxias de luminosidades parecidas y velocidades respectivas *cz* = 16.070, 36.880, 15.820, 15.690 y 15.480 kilómetros por segundo. *Quinteto de Stephan:* de nuevo cinco objetos de velocidades *cz* = 6700, 5700, 6700, 6700 y 800 kilómetros por segundo. *Sexteto de Seyfert:* en realidad constituido por tan solo cinco galaxias, de las que cuatro son lenticulares (*cz* = 4000 kilómetros por segundo) y una quinta galaxia (*cz* = 19.900 kilómetros por segundo) unida a una de las lenticulares por un filamento material.

Este muestrario de casos anormales se ha visto enriquecido gracias a los esfuerzos del astrónomo americano H. Arp. De estos nuevos ejemplos entresacamos los tres siguientes. *NGC 4151:* galaxia espiral de tipo Seyfert, bien conocida, cuyos dos brazos más externos llegan hasta dos galaxias satélites cuyos desplazamientos hacia el rojo son siete veces mayores que el de la galaxia central. *NGC 5297:* alrededor de esta galaxia (*cz* = 2500 kilómetros por segundo) se encuentra NGC 5296 (*cz* = 2500 kilómetros por segundo), uno de cuyos bordes está ocultado por un objeto compacto de velocidad *cz* = 25.000 kilómetros por segundo. Además, en las proximidades de NGC 5296 hay un quasar de desplazamiento hacia el rojo 100 veces superior. *NGC 1199:* caso en parte semejante al anterior. Un objeto compacto parece proyectarse sobre el borde de la galaxia. El análisis espectrofotométrico sugiere fuertemente que ese objeto, que se "desplaza" a una velocidad de 13.400 kilómetros por segundo, se encuentra delante de NGC 1199, que se "aleja" a 2600 kilómetros por segundo.

Citemos también los casos de NGC 3384, en cuyos alrededores se encuentran cinco quasars; el de M 82, acompañado por tres quasars situados a menos de 3,5 minutos de arco; o el de NGC 1073, con dos quasars en las extremidades de sus brazos y un tercero sobre uno de los brazos. En todos los casos los desplazamientos hacia el rojo de los quasars son muy superiores al de las galaxias. Estos son algunos de los casos "aberrantes". No pretendemos aquí que constituyan pruebas definitivas sobre la no adecuación de la explicación expansionista; al contrario, insistimos en que podrían ser casos de proyección casual, o incluso ser explicados por efectos que hoy aún no conocemos bien. Lo que nos parece improcedente es postular la simple yuxtaposición de imágenes y rechazar de entrada la posibilidad de que constituyan asociaciones reales bajo el pretexto de que no respetan la ley de la expansión.

Siguiendo con la idea de que el fenómeno del desplazamiento hacia el rojo (excepto naturalmente el debido a movimientos propios o a la gravitación) sólo se manifiesta a escala cosmológica, un método muy eficaz para contrastar la hipótesis expansionista consistía en buscar si el fenómeno se presenta donde "no debería", es decir, en el interior de las galaxias. Y, "a contrario", si existe una causa del desplazamiento hacia el rojo diferente de la expansión, ésta deberá manifestarse incluso donde la expansión es inoperante.

Por desgracia, aquí los resultados son pobres por la simple falta de datos. El análisis de las variaciones de *z* en una galaxia, y sobre todo, el poder diferenciar la contribución que corresponde a movimientos reales, es muy complejo y delicado. A pesar de ello se dispone de dos tipos de resultados. En primer lugar, el efecto de inclinación. Efectuado por el astrónomo finlandés T. Jaakkola, concierne a los campos de *z* de 25 galaxias. El análisis consiste en comparar los valores de *z* para la parte más próxima y para la más alejada del observador. En 18 de los 25 casos existen serios indicios de un exceso de *z* de la parte más alejada con respecto a la más próxima.

En segundo lugar, las observaciones relativas a nuestra galaxia. Citemos únicamente aquí las relativas a la curva de rotación galáctica. Esta presenta una curiosa asimetría entre la parte que corresponde al hemisferio galáctico norte y la correspondiente al hemisferio sur. De una manera ciertamente especulativa por el momento, pero coherente, nosotros hemos construido un modelo explicativo en el que esa asimetría se debe a la existencia de un mecanismo de desplazamiento hacia el rojo, que en principio es el mismo que se pondría de manifiesto en los casos anteriores citados.

Quisiéramos finalmente hacer referencia a un tipo de observaciones que pudieran servir de test sobre la naturaleza del desplazamiento hacia el rojo. Nos referimos a observaciones solares. Desde hace varias décadas se observó que la distribución de velocidad radiales a lo largo del disco solar no se correspondía con las previsiones de la relatividad general para el valor de este parámetro en el mismo borde. A pesar de la complejidad de los movimientos en la superficie del Sol, que hace muy problemática cualquier interpretación, parece que hay un exceso de *z* en el borde solar, que ni efectos cinemáticos ni gravitacionales pueden explicar. Por otro lado, el análisis de los datos del satélite *Pionneer* VI pone de manifiesto



CADENA DE CINCO GALAXIAS VV172. Descubierta y catalogada por Vorontsov-Velyaminov. Las cinco galaxias tienen luminosidades parecidas y sus velocidades simbólicas son 16.070, 36.880, 15.820, 15.690 y 15.480 kilómetros por segundo. Así, a pesar de que parecen físicamente conectadas y por lo tanto a la misma distancia, hay una galaxia con un desplazamiento hacia el rojo que es el doble que el de las otras. (Fotografía con el telescopio de 5 m de Monte Palomar, de H. Arp, de los Observatorios Hale.)

la posible existencia de una influencia del Sol sobre el desplazamiento hacia el rojo de las señales radioeléctricas emitidas por el satélite y recibidas en tierra. Este análisis mostró que esta influencia podría existir en el sentido de que el desplazamiento en frecuencia de la señal se incrementaba a medida que la distancia sobre el plano del cielo entre la sonda y el Sol disminuía.

Lo cierto es que con anterioridad se habían ya realizado observaciones de la posible variación del desplazamiento hacia el rojo de la frecuencia de ciertas líneas de emisión de algunas radiofuentes cuando son ocultadas por el Sol. Estos resultados, referidos a la línea de 21 centímetros emitida por Tau A y a la de 18 centímetros emitida por W 28S, eran contradictorios entre sí. De modo que se intentó una nueva observación de la ocultación de la radiofuente Tau A con el radiotelescopio de Bonn. A partir de los resultados del *Pionneer* VI, y admitiendo como hipótesis la misma explicación que se había elaborado, se pudo hacer la previsión teórica de la amplitud máxima del fenómeno que se pretendía observar. Esta previsión era de 30 ± 11 HZ. Lamentablemente, los resultados definitivos no han sido todavía publicados, debido en parte a la complejidad de la reducción de las observaciones. El problema sigue abierto.

Además del problema del valor de la constante de Hubble, e incluso antes, se plantea la cuestión de saber si se trata o no realmente de una constante. Sabemos que la hipótesis expansionista atribuye a H_0 un valor único y bien definido, el mismo para todos los objetos, cualquiera que sea su situación. Siguiendo con el plan de contrastar esta hipótesis con las observaciones, intentamos estudiar la dependencia de H_0 con la localización espacial de los objetos, es decir, la homogeneidad e isotropía de H_0.

Las primeras indicaciones de una posible variación de H_0 con la distancia, se pusieron de manifiesto al comparar el valor que se encontraba en el interior del Supercúmulo Local ($H_0 = 85$) con el hallado para la Metagalaxia ($H_0 = 50$). Luego se hicieron otros estudios que mostraban una variación de H_0 con la distancia en la dirección del anticentro del Supercúmulo Local. Pero los resultados más interesantes vinieron del análisis de la isotropía de H_0.

En 1973, V. Rubin y sus colaboradores presentaron un nuevo efecto que aparecía como una anisotropía en la distribución de desplazamiento hacia el rojo de una muestra de galaxias de tipo ScI, entre dos regiones del cielo. Mientras que sus magnitudes aparentes tenían los mismos valores medios en ambas regiones, había una diferencia de unos 1500 kilómetros por segundo entre las velocidades medias. Los autores consideraron inicialmente, a modo de explicación, una variación de H_0 con la dirección; más adelante, tras haber ampliado la muestra, pensaron en un movimiento real del Grupo Local de galaxias (al cual pertenecemos) con respecto a galaxias más lejanas. Sin embargo, tal interpretación suscita graves problemas: el movimiento del Sol así calculado parece estar en contradicción con los más recientes resultados obtenidos a partir del estudio de la isotropía de la radiación de fondo, que es del orden de 400 kilómetros por segundo en una dirección a 120 grados de distancia angular de los 600 kilómetros por segundo de Rubin y colaboradores.



SEXTETO DE SEYFERT, constituido por cinco galaxias en realidad. Cuatro son lenticulares y tienen cz = 4000 kilómetros por segundo; la quinta, que aparece ligada por un filamento material a una de las galaxias lenticulares tiene cz = 19.980 kilómetros por segundo. (Como las dos restantes, esta fotografía la tomó, con el telescopio de cinco metros de Monte Palomar, H. Arp, de los Observatorios Hale.)

Este efecto ilustra magníficamente las dificultades con las que tropieza actualmente el modelo cosmológico ortodoxo. Si se le quiere integrar en el cuadro "standard", se entra en contradicción con la interpretación de la radiación de fondo, a menos que se acepte que el inmenso conjunto de galaxias que nos rodea hasta la distancia de 100 megaparsec tenga un movimiento de conjunto de unos 1000 kilómetros por segundo. La aparición de este efecto motivó una serie de trabajos en los que intentamos analizar diferentes muestras de objetos con el fin de comprobar si el efecto estaba también presente. De cinco muestras analizadas, se encontró en cuatro, pero no en la quinta. Intentando encontrar la explicación, pasamos a estudiar el significado de la frontera que de manera arbitraria Rubin y sus colegas habían trazado para separar sus dos regiones.

Pudo así comprobarse que la situación relativa entre los objetos analizados y los principales cúmulos de galaxias que se hallan entre ellos y el observador tenía que ver con la aparición del efecto. Se analizó la distribución de valores de z, no ya entre aquellas dos regiones, sino separando de los demás los objetos cuya luz atravesaba alguno de los cúmulos intermedios para llegar al observador. El análisis mostró que las galaxias cuya luz tenía que atravesar mayores concentraciones de materia presentaban un exceso de desplazamiento hacia el rojo con respecto a las otras, aun estando a la misma distancia; siendo la diferencia de unos 2000 kilómetros por segundo. Todas las muestras analizadas dieron ese mismo resultado, incluida la que no presentaba el efecto descubierto por V. Rubin y colaboradores. De modo que quedaba claro que, para las muestras que presentaban el efecto Rubin, los dos tipos de fronteras eran equivalentes, mientras que para la otra sólo la división con respecto a la posición de los cúmulos tenía sentido.

En conclusión a toda esta enumeración de observaciones "heterodoxas" en cuanto a sus consecuencias, diremos que la hipótesis de la expansión del Universo sigue siendo una hipótesis, cuya base empírica no se nos presenta como sólidamente establecida.

Los objetos más compactos y activos

son los que muestran exceso de desplazamiento hacia el rojo, mientras que z se ve también afectado por las mayores o menores concentraciones de materia que la luz tiene que atravesar. Es decir, todo parece indicar que el desplazamiento hacia el rojo podría también depender de la densidad de materia, ya sea del objeto mismo que emite la luz, o de las regiones que ésta atraviesa para llegar al observador. Y aunque nosotros mismos hemos elaborado una explicación teórica de estos fenómenos, el problema se plantea en estos momentos y de manera fundamental en el terreno de las observaciones, ya que de lo que por el momento se trata es de saber si efectivamente el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales emitidas por los objetos extragalácticos dependen exclusivamente de la distancia, como la expansión pretende, o depende de otros parámetros.

La cosmología ortodoxa no sólo pretende explicar el origen del desplazamiento hacia el rojo, sino también otras observaciones consideradas de alcance cosmológico: abundancia de helio y deuterio y existencia de una radiación de fondo con el espectro planckiano correspondiente a una temperatura de unos 3 grados K. De modo que, para muchos astrónomos, los argumentos antes evocados no pueden constituir a lo máximo sino dificultades transitorias, que serán pronto reabsorbidas por el modelo "standard", cuya veracidad está prácticamente fuera de duda.

Sabido es que una teoría falsa puede tener consecuencias que se corresponden con la realidad. En lo tocante a la radiación de fondo, resulta curioso señalar que en 1954, el astrónomo Findlay-Freundlich, partiendo de una teoría que luego resultó ser falsa, hizo la predicción de la existencia de una radiación de fondo isótropa y planckiana, cuya temperatura estaría comprendida entre 1,6 y 7 grados K. Además, la extrema isotropía de la radiación de fondo comienza por su parte a crear problemas. Por un lado, la isotropía a gran escala permite inferir un movimiento general de nuestro sistema con respecto al referencial que esa radiación constituye, difícilmente compatible con otras estimaciones de ese movimiento y en particular con la interpretación del efecto de Rubin. Por otro, la isotropía observada a pequeña escala impone severísimos límites a los posibles mecanismos de formación de galaxias.

Las cuestiones de la radiación de fondo y de la abundancia del He se ven viciadas por la adjunción del adjetivo cósmico. En efecto, al hablar de la radiación de fondo se admite sin más que ésta llena todo el universo. Sin embargo, no se dispone en el momento actual de ninguna prueba observacional de la universalidad de tal radiación; al contrario, son las necesidades de una explicación que quiere aplicársele lo que hace que se presuponga su universalidad. No puede excluirse la posibilidad de que esta radiación esté asociada a un sistema material, más o menos extenso, sin que sea necesariamente todo el universo.

En lo que se refiere al He las reflexiones son semejantes. Por un lado, hay vías de explicación sin explorar (producción en cuerpos muy masivos, aumentos de luminosidad de las galaxias, etcétera) mientras que, por el otro, se añade detrás del sustantivo abundancia el adjetivo cósmico o universal. Proposición que evidentemente está por probar. Recordemos, finalmente, que uno de los hechos capitales, la existencia misma de la galaxia y de los grupos de galaxias, sigue sin encontrar explicación adecuada en el marco de la teoría de la expansión.

Cuando se habla de cosmología, suele considerarse ésta como el estudio del Universo en su conjunto, definición que presenta un grave inconveniente. Este consiste en que nuestras conclusiones globales arrancan de observaciones que se refieren a una región espacio-temporal limitada; región de la que no podemos afirmar si es grande o pequeña con respecto al todo, y de la que no podemos afirmar si constituye una muestra fiel y representativa de todo el Universo. Poder responder a tal cuestión presupondría el conocimiento de todo el Universo, es decir, haber resuelto el problema que nos ocupa. En estas condiciones, hacer un modelo global que coincida localmente con lo que se observa es un problema con múltiples soluciones, de las que la habitualmente considerada no es más que un ejemplo particular.

Otro problema grave de la cosmología en su concepción habitual es la idea de la evolución global del Universo. Esta noción sugiere la pregunta de con respecto a qué evoluciona el Universo. La respuesta, raramente explicitada, consiste en admitir que éste evoluciona con respecto a sí mismo, es decir, con respecto a un estado anterior. Prolongando este razonamiento se llega así a la conclusión de que la evolución se realiza con respecto al momento inicial, es decir, con respecto a una situación que resulta inabordable para la física. La cosmología, actividad científica del siglo XX, tendría así su referencia fundamental, su "clé de voûte", en una circunstancia que, en tanto que actividad científica, literariamente la trasciende. La contradicción entre esta situación y los supuestos básicos de toda actividad científica nos parece flagrante.

A menudo, cuando se plantea la crítica del modelo expansionista, se oye la pregunta sobre el modelo que vendría a reemplazarlo; como si la no existencia de visión alternativa fuese una garantía para la que ya existe. No cabe duda de que la modelización tiene un importante papel que desempeñar, en cuanto pueden representar una fase de síntesis de lo conocido, con inevitables proyecciones hacia nuevas direcciones de investigación; nuevas orientaciones que sugieren nuevas observaciones, las cuales vendrán a confirmar o corregir el modelo, hasta que éste quede definitivamente desfasado. En cuyo caso, dada la absoluta primacía de los hechos sobre las teorías, tendrá que dar paso a una nueva síntesis.

Con esas premisas, frente a la concepción habitual de la cosmología, que para algunos constituye simplemente un mito, a pesar de los ropajes matemáticos, cabe avanzar otra, quizá menos ambiciosa en apariencia, pero más realista. Consistiría ésta en atribuir a la cosmología el estudio de las leyes que gobiernan el comportamiento de la materia a gran escala. La cual se iría ensanchando con las nuevas posibilidades observacionales. No se trata de postular un estrecho empirismo de lo observable, sino de intentar ir cada vez más lejos sobre la base de la comprensión de lo que en ese momento nos es accesible. Y en función de lo que es verificable. Evitando así explicaciones sobre nuestro entorno cósmico basadas en teorizaciones sobre un todo, el universo, que en su globalidad es manifiestamente inaprehensible.

Resulta en este sentido paradójico el que se pretenda conocer y comprender la estructura básica del Universo y lo que ocurrió en los primeros instantes después de la gran explosión, cuando el origen de la energía radiada por el Sol sigue planteando problemas (cuestión de los neutrinos solares), cuando seguimos sin comprender cómo se formaron los anillos de Saturno, el sistema solar, o cómo nacen las estrellas, cuál es el origen de las galaxias, qué es el fenómeno quasar, etcétera. Se pretende conocer el todo, globalmente, cuando sus partes más inmediatas siguen envueltas en el misterio.

Con la terminología de la teoría de conjuntos podríamos decir que la acepción habitual de la cosmología supone una definición intensiva del Universo; esta definición nos parece no operativa, pues afirmar que el Universo es todo lo que existe constituye, obviamente, una pura tautología.

Por el contrario, la otra acepción antes expuesta constituiría una definición extensiva del Universo, como muestrario al que se le van añadiendo nuevos descubrimientos sobre los que se intentan operar nuevas síntesis. Esta definición se acomoda perfectamente a lo que ha sido la evolución de esta ciencia, y facilitaría una actitud abierta frente a los nuevos resultados de observación.

En definitiva el núcleo del problema cosmológico lo constituye la dualidad "escala local-estudio global". Dualidad que arranca sin duda del carácter esencialmente inductivo del camino que se pretende trazar desde las observaciones hasta una generalización teórica que pudiera ser válida para "todo el Universo". El ámbito reducido en el que esas observaciones se realizan limitan su validez. Aún más, incluso su toma en consideración con respecto a la cuestión cosmológica puede resultar ambigua, en la medida en que su significación cosmológica puede depender del modelo en el que se quieran integrar. El caso de la abundancia del He ilustra perfectamente esta situación: la cosmología actual, a partir de observaciones escasas y de fiabilidad variable, asume la sobreabundancia que en algunos casos se ha observado, y la eleva a categoría de verdad cosmológica. El problema del He, convertido de esta manera en hecho de relevancia para la cosmología, va a ser brillantemente explicado en el marco del modelo, cuya existencia había facilitado en gran manera la especial consideración dada al caso del He.

Ningún modelo teórico puede sobrevivir cuando las observaciones dejan de "respetarlo", y éste será también el caso de los actuales modelos cosmológicos si las observaciones que lo contradicen se confirman en el futuro. Pero en el caso de la cosmología la cuestión es mucho más complicada, no sólo por el carácter meramente observacional de la actividad y por la no univocidad del análisis de los datos, sino también por toda la carga ideológica que inevitablemente conlleva. Lo cual favorece una determinada actitud frente a lo que las observaciones producen, y da por lo tanto mayores posibilidades a ciertos tipos de síntesis teóricas.

Temas metamágicos

Tertulia donde se discurre sobre el test de Turing y la posibilidad de crear máquinas pensantes

Douglas R. Hofstadter

En la tertulia participan Cris, estudiante de físicas, Pachi, que cursa biológicas, y Santi, un filósofo en ciernes.

CRIS: Santi, tengo que darte las gracias por hacerme leer el artículo «Computing Machinery and Intelligence», de Alan Turing. [Hay una reimpresión, en castellano, en el Tomo VI de «Sigma, el mundo de las matemáticas», de J. R. Newman. Ediciones Grijalbo.] ¡Es formidable! Me ha hecho pensar..., y me ha hecho pensar sobre mi pensamiento.

SANTI: Me alegro. Y qué, ¿sigues igual de escéptico sobre la posibilidad de la inteligencia artificial?

CRIS: Me has entendido mal. No estoy en contra de la inteligencia artificial. Debe ser cosa maravillosa..., quizás una chifladura... pero, en fin, ¿por qué no? Lo que pasa es que vosotros, los forofos de la I.A., habéis menospreciado demasiado la mente humana. Hay cosas que un ordenador nunca, pero es que nunca, será capaz de hacer. ¿Te imaginas, por ejemplo, una computadora escribiendo las novelas de Proust? La riqueza de inventiva, la complejidad de los personajes...

SANTI: ¡Zamora no se tomó en un hora!

CRIS: Por el artículo, se ve que Turing debe de ser persona muy interesante. ¿Vive todavía?

SANTI: No; murió en 1954, con sólo 41 años. Hoy tendría 67. Pero se ha convertido en personaje tan legendario que se me hace raro pensar que pudiera estar vivo todavía.

CRIS: ¿Cómo murió?

SANTI: Es casi seguro que se suicidó. Era homosexual, y ello le valió toda suerte de persecuciones. Al final, parece que se le hostigó tanto que no pudo aguantar más.

CRIS: Una verdadera lástima.

SANTI: Sí, desde luego. Lo más triste es que no pudo ver el tremendo desarrollo de la teoría de computabilidad ni de los sistemas de proceso de datos.

PACHI: Pero bueno, ¿de qué rollo va todo eso del artículo de Turing?

SANTI: No va de uno, sino de dos. Primero, la cuestión de si las "máquinas pueden pensar", o mejor dicho, "¿llegará a pensar una máquina?". La forma en que Turing responde –incidentalmente, él responde que sí– consiste en ir echando abajo, una tras otra, toda una serie de objeciones a esta idea. Su otro objetivo es mostrar que, así planteada, la pregunta carece de sentido. Está demasiado cargada de connotaciones emocionales. A mucha gente le indigna la sola idea de que las personas puedan ser comparadas a las máquinas, o que las máquinas puedan pensar. Turing se esfuerza en desactivar la bomba implícita en la cuestión, replanteándola en términos emotivamente más neutros. ¿Qué te parece la posibilidad de una máquina pensante?

PACHI: Francamente, me parece que el término induce a confusión. ¿Sabes por qué? Por todos esos anuncios de la prensa y la televisión, desgañitándose sobre "productos que piensan", "electrodomésticos inteligentes" y demás. No sé hasta qué punto podamos tomarlos en serio.

SANTI: Sí, ya sé de qué me hablas. Buena es la confusión que están creando. Por una parte, nos dicen que, en realidad, "los ordenadores son máquinas estúpidas, que es preciso dárselo todo hecho, hasta el menor detalle"; y por otra, nos bombardean con droga publicitaria, emborrachándonos de "productos inteligentes".

CRIS: En eso tienes mucha razón. ¿Sabes que incluso hay una compañía que ha dado en llamar "terminales idiotas" a sus fabricados, con ánimo de llamar la atención?

SANTI: No son tontos, no. Pero son también oficiantes en la ceremonia de la confusión. Cuando pienso en estas cosas me viene siempre a la mente la frase "cerebro electrónico", que tan popular fue hace unos años. Unos se la han tragado hasta... los pies. Otros la rechazan de plano. Hay que tener paciencia e ir analizando todos los aspectos para separar el grano de la paja.

PACHI: ¿Propuso Turing algún método concreto? Vamos, algo así como un test psicotécnico para calculadoras...

SANTI: Sí que sería interesante... Pero no, ninguna máquina actual puede, ni de lejos, enfrentarse a ninguna prueba de esas. En cambio, Turing propone un ejercicio que, en teoría, podría encomendarse a cualquier máquina para averiguar si es o no capaz de pensar.

PACHI: Y ese test, ¿da una respuesta taxativa? ¿Consigue establecer que sí o que no? Si me dices que sí me va a costar mucho creerlo.

SANTI: No, no, qué va... En cierto modo, ésta es una de sus ventajas, porque muestra lo desdibujado de la línea divisoria entre inteligencia y no inteligencia, y lo sutil de todo el problema.

PACHI: Y por tanto, como suele ocurrir en filosofía, todo es cosa de palabras.

SANTI: Puede ser. Pero son palabras henchidas de carga emotiva. Y por eso me parece importante examinar la cuestión y precisar el significado de las ideas clave. Y como es cuestión que afecta directamente a la imagen y la comprensión de nosotros mismos, opino que no debemos barrerla debajo de la alfombra.

PACHI: Dinos entonces cómo funciona el criterio de Turing.

SANTI: La idea se inspira en lo que Turing llama juego de imitación. Un hombre y una mujer se encierran en habitaciones distintas, pudiendo ser interrogados por una tercera persona a través de algún sistema de teletipo. El tercer individuo puede dirigir preguntas a cualquiera de las habitaciones, pero no tiene la menor idea de quién ocupa cada cuarto. El objetivo del interrogador es determinar en qué habitación se encuentra la mujer. Esta, en sus respuestas, se esfuerza en ayudar al interrogador lo más que puede. Por su parte, el hombre trata por todos los medios de confundirle, y para ello responde como piensa que haría la mujer. Y si consigue dársela con queso al interrogador...

PACHI: El interrogador recibe sólo impresos del teletipo, ¿eh? ¿Se supone, pese a ello, que los autores de los textos manifestarán de alguna forma si son hombre o mujer? Como problema, no está nada mal. Me encantaría tomar parte en el juego alguna vez. ¿Conoce el interrogador al hombre o la mujer antes de empezar el juego? ¿Podría alguno de los tres conocer a los demás?

SANTI: Probablemente no convenga. Si el interrogador conociera a los otros podrían transmitirse toda clase de pistas por vía subliminal. Creo que sería

mucho más interesante que las tres personas se desconocieran absolutamente.

PACHI: ¿Y sería lícito formular cualquier pregunta, sin tabúes de ningún tipo?

SANTI: Sí, de eso se trata.

PACHI: ¿No te parece entonces que la conversación derivaría muy pronto hacia una serie de preguntas de intención sexual? Ya estoy viendo al hombre, ansioso por parecer convincente, enseñando el plumero al contestar ciertas preguntas poco delicadas, que la mayoría de las mujeres se negarían a responder por considerarlas demasiado íntimas, ni siquiera a través de una conexión anónima y por teletipo.

SANTI: Pudiera ser, sí.

CRIS: Otra posibilidad sería explorar las diferencias tradicionales de los roles femenino y masculino; por ejemplo, preguntar sobre tallas de prendas de vestir, y cosas por el estilo. En el juego de imitación se podría llegar a matices psicológicos muy sutiles. Supongo que también influiría el hecho de que el interrogador fuese una mujer, en vez de un hombre. ¿No te parece que una mujer sabría detectar ciertas diferencias más rápidamente que un hombre?

PACHI: Claro... Quizá sea *eso* lo que distinga a un hombre de una mujer.

SANTI: Vaya, esta faceta es nueva... En todo caso, desconozco si esta original variante del juego de imitación ha sido ensayada seriamente alguna vez, y eso pese a lo fácil que sería hoy realizarlo desde las terminales de un ordenador. Tengo que admitir que, cualquiera que fuese el resultado, no estoy seguro de que se demostrara nada.

PACHI: Me lo estaba preguntando yo también. ¿Qué se habría demostrado si el interrogador –una mujer, por ejemplo– fuese incapaz de atinar cuál de las personas es mujer? Está claro que no se habría demostrado que el hombre *es* mujer.

SANTI: Exactamente. Y lo que encuentro curioso es que, a pesar de que estoy absolutamente persuadido de la validez del criterio de Turing, no estoy seguro de cuál sea el objetivo del juego de imitación en que se inspira.

CRIS: La verdad es que, como método, el criterio de Turing para máquinas pensantes me complace tan poco como el juego de imitación como sistema para comprobar la feminidad...

PACHI: Por lo que decís, me da la impresión de que el criterio de Turing es una especie de juego de imitación, generalizado, sólo que colocando ahora en las distintas salas a una máquina y una persona.

SANTI: Pues sí, esa es la idea. La máquina se esfuerza al máximo para persuadir al interrogador de que ella es un ser humano, mientras que el humano procura demostrarle que él –o ella– no es ningún ordenador electrónico.

PACHI: Salvo la frase "la máquina se esfuerza", el resto parece muy interesante. De todas formas, ¿cómo sabes que este criterio permitirá captar la esencia de lo que llamamos pensamiento? Quizá sirva para constatar lo erróneo. Imaginemos, por dar un ejemplo cualquiera, que a alguien se le ocurra que sólo si la máquina fuese capaz de bailar como un humano podría admitirse que piensa. Y otras personas podrían sugerir características diferentes. En el fondo, ¿qué tiene de particular engañar a una persona a través de mensajes escritos a máquina?

SANTI: No sé cómo puedes decir en serio semejantes cosas. Ya he oído esta objeción en otras ocasiones; francamente, me desconcierta. ¿Qué tendría de particular que la máquina fuese *incapaz* de bailar o de tirarte piedras? Pero si la máquina fuese capaz de discurrir inteligentemente sobre cualquier tema que le propusieras, ¿no te estaría demostrando que es capaz de pensar? A mí, por lo menos, sí. Tal como yo lo veo, Turing ha marcado, de un plumazo, una divisoria clara entre el pensamiento y otros aspectos de la conducta humana.

PACHI: Ahora eres *tú* quien me desconcierta a mí. Vamos a ver, si antes no lograste sacar ninguna conclusión clara sobre la habilidad de los individuos para ganar el juego de imitación, ¿cómo es que ahora sí puedes sacarla de la capacidad de una máquina para ganar el juego de Turing?

CRIS: Buena pregunta.

SANTI: A mí me parece que sí se podría sacar *alguna* conclusión, en el caso de que el hombre consiguiera ganar al juego de imitación. Está claro que no se puede concluir que él sea mujer, pero seguramente sí se podría asegurar que tiene ideas claras sobre la mentalidad femenina (si es que existe algo así). Ahora, si una computadora suplantara con éxito a una persona, en una conversación entre individuos de carne y hueso, me imagino que tendríamos que decir de ella algo parecido, o sea, que es capaz de percibir claramente la condición humana, sea ésta lo que fuere.

PACHI: Puede ser. Pero lo que dices no es exactamente lo mismo que pensar, ¿verdad? En mi opinión, si la máquina consiguiese salir triunfante del test de Turing tan sólo nos habría demostrado su capacidad de *imitar* formidablemente el pensamiento.

CRIS: Difícilmente podría estar más de acuerdo con Pachi. Todos sabemos que hoy existen fantásticos programas para simular, mediante ordenador, toda clase de complejos fenómenos. En física, por ejemplo, se puede simular el comportamiento de partículas, átomos, sólidos, líquidos, gases y hasta galaxias. Pero a nadie se le ocurriría confundir estos modelos matemáticos con el auténtico fenómeno.

SANTI: En *Brainstorms,* un libro del filósofo Daniel Dennett, se insiste mucho en eso que dices; allí se refiere a la simulación de huracanes.

CRIS: Es buen ejemplo, qué duda cabe. Lo que pueda suceder en el seno de un ordenador mientras está simulando los efectos de un huracán no es un huracán, eso desde luego. La memoria de la máquina no queda hecha pedazos por los vientos de 300 kilómetros por hora, ni el piso del edificio se inunda con los aguaceros, ni...

SANTI: Bueno, bueno,... No te embales. Tu razonamiento es falaz. Para empezar, los programadores no pretenden hacernos creer que la simulación *sea* un verdadero huracán; tan sólo simulan determinados aspectos. Pero, en segundo lugar, al dar a entender que el huracán simulado carece de aguaceros y tornados me estás largando un golpe bajo. No los habrá para *nosotros;* pero si el programa estuviese infinitamente detallado podría dar cabida también a personas simuladas, quienes en tierra sufrirían las trombas de agua y las rachas de viento lo mismo que nosotros cuando nos vemos atrapados en una tormenta. Y, en sus mentes –o por complacerte, en sus *simuladas* mentes–, el huracán nada tendría de ficticio, sino que sería auténtico. Sus sensaciones, al verse empapados por la lluvia, al luchar contra el viento y contemplar la catástrofe, serían idénticas a las nuestras.

CRIS: ¡Menuda novela de ciencia ficción! Hace un momento discutíamos sobre una sola mente. Ahora ya tenemos poblaciones completas.

SANTI: Sólo trato de haceros ver por qué hay una falacia en vuestro razonamiento. Cuando hacéis distinción entre el fenómeno "auténtico" y el "simulado" estáis suponiendo, tácitamente, que todo antiguo observador del fenómeno ahora simulado será capaz de juzgar y valorar con precisión lo que ahora observa. Y, en realidad, tal vez haga falta un observador muy avezado para darse cuenta de lo que de veras sucede. En nuestro caso, nos harían falta unas "gafas de ordenador" especiales para poder percibir las lluvias y los vientos.

PACHI: ¿Gafas de ordenador? ¿Pero de qué estás hablando?

SANTI: Quiero decir que, para percibir los vientos y la humedad del huracán, tendríamos que mirarlo en la forma adecuada. Tendríamos que...

PACHI: ¡No, no y no! Un huracán simulado no moja. Poco importa cuánto parezca mojar a cosas que simulen gente. ¡Su humedad nunca será *auténtica*! Ningún ordenador quedará hecho pedazos durante el proceso de simulación.

SANTI: ¡Pues claro que no! Pero date cuenta de que estás mezclando dos niveles de expresión y razonamiento. Tampoco las leyes de la física van a saltar en añicos por los huracanes, sean éstos todo lo auténticos que quieras. En el caso del huracán simulado, si al meter las narices en la memoria del ordenador esperásemos encontrar cables rotos y cosas por el estilo nos llevaríamos un chasco, claro. Pero observémoslo al nivel adecuado. Fijémonos en las *estructuras* que han sido codificadas en la memoria, y veremos que ciertos enlaces abstractos han quedado rotos, que determinados valores de las variables han cambiado radicalmente; etcétera. Ahí tienes las inundaciones y las catástrofes. Lo único que pasa es que están un poco ocultas, que no saltan a la vista.

CRIS: Lo siento, pero no me lo creo. Tú te empeñas en que yo busque un nuevo tipo de catástrofe, una catástrofe que nunca ha estado asociada con huracanes. Siguiendo por ese camino, podríamos decir de *cualquier* cosa que es un huracán con tal de que sus efectos, vistos a través de tus gafas especiales, puedan ser llamados inundaciones y catástrofes.

SANTI: ¡Exacto! ¡Ahora lo has entendido! Los huracanes se reconocen por sus *efectos*. No hay forma de meterse en ellos y extraer una etérea "esencia de huracán", justo del ojo del ciclón. No. Es la manifestación de ciertas *pautas* –el ciclón con su estructura espiral, y demás– lo que nos hace reconocer al huracán. Claro, hay otras muchas cosas que comprobar antes de decidirnos a declarar que es un huracán, pero...

PACHI: ¿Te molestaría mucho admitir como condición necesaria que fuese un fenómeno *atmosférico*? ¿Cómo va a ser un huracán algo que está ocurriendo dentro de un ordenador? Mira, para mí, una simulación nunca será más que eso: simulación.

SANTI: Supongo, entonces, que también dirías que los *cálculos* que ejecutan las computadoras no son auténticos cálculos, sino cálculos de mentirijillas. Unicamente las personas podemos hacer auténticos cálculos, ¿verdad?

PACHI: Bueno, los ordenadores dan las soluciones correctas, así que sus cálculos no pueden ser totalmente de mentirijillas. Pero la verdad es que no pasan de ser *pautas,* configuraciones, disposiciones de símbolos. La máquina no comprende nada. Fijémonos en una caja registradora. ¿Podrías decir en serio que, desde tu punto de vista, la máquina está verdaderamente *calculando* algo cuando sus engranajes van transmitiendo su giro de unos a otros? Tal como yo lo veo, un ordenador no es más que una gran y fantástica caja registradora.

SANTI: Si pretendes decirme que la registradora no se parece a un escolar haciendo los deberes, estoy de acuerdo. Pero, ¿es así como supones que debemos calcular? En tal caso, y contrariamente a todo lo que se había pensado hasta ahora, para realizar *auténticos* cálculos tendremos que redactar programas enormemente complicados. Estos programas tendrán que sufrir despistes, distracciones y errores; garrapatear cifras ilegibles, de cuando en cuando, y dibujar monigotes en los márgenes. La fiabilidad de sus resultados no debería, en ningún caso, ser mejor que los de un dependiente de droguería echando las cuentas a lápiz. Ahora bien, estoy convencido de que terminará por prepararse un programa así. No servirá para calcular, pero sí aprenderemos algo sobre escolares y dependientes de comercio.

PACHI: ¡Pues no creo que jamás pueda lograrse un programa como ése!

SANTI: Quizá sí, quizá no. Pero no se trata de eso. Afirmas que una registradora no puede calcular, lo que me recuerda uno de mis pasajes favoritos del *Brainstorms,* de Dennett. Reza aproximadamente así: "En realidad, las cajas registradoras no pueden calcular. Lo único que pueden hacer es transmitir el giro de sus engranajes. Aunque, en realidad, las registradoras tampoco pueden hacer girar sus ruedas y piñones: se limitan a obedecer las leyes físicas". Dennett se refería a los ordenadores; yo lo he adaptado a las cajas registradoras. Claro que la misma argumentación podría aplicarse a las personas: "En realidad, las personas no pueden calcular; todo lo que pueden hacer es manipular símbolos mentales. Pero, en realidad, tampoco manipulan símbolos; lo único que hacen es excitar determinadas neuronas según determinadas pautas. Aunque en realidad tampoco son capaces de excitar sus neuronas; se limitan a dejar que las leyes físicas y químicas exciten las neuronas en su beneficio". Etcétera ¿te das cuenta? Por este proceso de reducción al absurdo acabarás concluyendo que los cálculos no existen, que los huracanes no existen, que no existe nada a nivel superior al de la física de partículas y de las leyes fundamentales de la física. ¿Qué se gana al decir que un ordenador tan sólo es capaz de llevar símbolos de acá para allá, pero que no es verdaderamente capaz de calcular?

PACHI: El ejemplo es demasiado exagerado, pero sí deja claro mi punto de vista, a saber, la vasta diferencia entre fenómenos genuinos y cualesquiera simulaciones que puedan hacerse de ellos. Lo cual, siendo cierto ya para los huracanes, lo es mucho más para el pensamiento.

SANTI: Mira, no tengo intención de dejarme embrollar hasta el infinito con esta cuestión, pero sí quiero probar con otro ejemplo más. Si fueses un radioaficionado, a la escucha de otro que transmita en Morse, y tú respondieses también en Morse, ¿te parecería raro oír hablar de "la persona situada al otro extremo"?

PACHI: Me parecería natural, claro. Aunque la existencia de una persona al otro lado del aparato no pasaría de ser una presunción.

SANTI: De acuerdo, pero no es probable que fueras a verificarlo, porque estás predispuesto a reconocer la presencia de personas incluso a través de estos conductos no muy habituales. No es preciso que veas un cuerpo humano ni que oigas su voz. Todo lo que necesitas es una manifestación, francamente abstracta, un código. Y ahora verás adónde voy. Para "ver" a la persona que emite los "Dits" y "Daats" es necesario estar dispuesto a cierta *decodificación,* o sea, a realizar cierta interpretación. La percepción no es directa, sino indirecta. Antes de dar con el meollo de la realidad allí presente hay que mondar una o dos pieles. Por así decirlo, para "ver" a la persona situada tras los pitidos hay que ponerse "gafas de radioaficionado". Con el huracán simulado ocurre lo mismo. Si lo vemos, no es porque deje a oscuras la sala de la máquina. No; es preciso decodificar la memoria de la máquina, hay que ponerse las "gafas especiales" para decodificación. Y *entonces* lo que se ve sí es un huracán.

PACHI: ¡Vaya larga cambiada! ¡Esta sí que es buena! En el caso de la estación de radio sí hay una persona auténtica, esté en las islas Fiji o dónde sea. El acto de ponerse al receptor y descifrar las señales revela precisamente la

existencia de la otra persona. Es como ver una sombra y deducir que hay un objeto que la está proyectando. Pero, al hacerlo, no confundimos la sombra con el objeto. En el caso del huracán simulado, ni siquiera hay al otro lado de la ventana una auténtica tormenta cuyo desarrollo vaya siguiendo el ordenador. No, lo que tienes es la sombra de un huracán, pero sin huracán que la proyecte. Me niego en redondo a confundir sombras con realidades.

SANTI: De acuerdo, no vamos a embarrancar aquí la conversación. Incluso, estoy dispuesto a conceder que es idiota decir que un huracán simulado *es* un huracán. Tan sólo quería hacer notar que no es tan absurdo como podría parecer a primera vista. Y cuando nos fijamos en la simulación de pensamiento, la situación es muy distinta de la simulación de huracanes.

PACHI: No veo por qué. Vas a tener que convencerme.

SANTI: Para eso, necesitaré hacerte ver un par de cosas más sobre los huracanes.

PACHI: ¡Hombre, no! En fin, resistiré hasta el final.

SANTI: Nadie puede decir exactamente qué sea un huracán, definirlo con todo rigor. Hay ciertas pautas compartidas por muchas tormentas –pautas que son de carácter abstracto–, que cuando se observan en una particular nos hacen decir que es un huracán. Ahora, no es posible distinguir tajantemente huracanes de no-huracanes. Hay tornados, ciclones, tifones, trombas... La Gran Mancha Roja de Júpiter, ¿será un huracán joviano? ¿Son huracanes las manchas solares? ¿Podrá haber huracanes en un túnel de viento, de los usados para ensayos aerodinámicos? ¿Y en un tubo de ensayo? Con la imaginación, podríamos generalizar la noción de huracán hasta dar cabida en el concepto a una tormenta microscópica en la superficie de una estrella de neutrones.

CRIS: La idea no está traída con fórceps. En realidad, ya se ha generalizado la noción de terremoto a las estrellas de neutrones. Los astrofísicos afirman que los diminutos cambios de ritmo que se observan, de vez en cuando, en algunas estrellas pulsantes son debidos a fallas –astromotos– que acaban de producirse en la superficie de una estrella de neutrones.

SANTI: Sí, ahora lo recuerdo. Una falla astrotectónica... qué idea más inconcebible. ¿Te imaginas una teoría de tectónica de placas sobre una esfera gigantesca de materia nuclear en estado puro? Pero así, astromotos y terremotos pueden ser ambos englobados en una sola categoría nueva, remontándonos un peldaño en abstracción. De esta forma va la ciencia generalizando continuamente conceptos ya familiares, alejándolos cada vez más de la experiencia cotidiana, pero conservando siempre una misma esencia. Quizás el ejemplo más clásico sea la teoría de números: de los enteros positivos a los negativos, luego, a los números racionales, y, más tarde, a los reales y complejos...

PACHI: Ahora creo que sé por dónde vas, Santi. En biología hay muchos casos donde relaciones muy estrechas quedan reflejadas de formas verdaderamente abstractas. Con frecuencia, la decisión de a qué familia pertenece una determinada especie depende de una cierta característica abstracta que todos los miembros de la familia comparten a determinado nivel. Cuando el sistema de clasificación se inspira en rasgos muy abstractos, me imagino que podrán entrar dentro de la misma categoría fenómenos de muy diversa condición, aunque en sus aspectos más superficiales los miembros de una misma clase puedan diferir. Así, tal vez pueda yo también entrever, al menos en parte, por qué para ti la simulación del huracán puede *ser* un huracán, aunque lo sea en un sentido bastante curioso.

CRIS: A lo mejor, la palabra que estamos generalizando no es "huracán", sino el verbo "ser".

PACHI: ¿Por qué dices eso?

CRIS: Si Turing supo generalizar el verbo "pensar", ¿por qué no puedo yo generalizar el verbo "ser"? Pero lo único que pretendo decir es que cuando, deliberadamente, se procede a identificar lo simulado con lo auténtico, estamos, o nos están, echando humo a los ojos. Pues no se trata meramente de generalizar unos cuantos sustantivos, "huracán" entre ellos. No, la cuestión es mucho más seria.

SANTI: Me agrada la idea de que se está generalizando el significado de "ser". Pero no estoy conforme en lo de querer cegarnos. Y si me permitís, quisiera decir otra cosa más acerca de los huracanes simulados antes de pasar a la simulación de pensamiento. Supongamos que se tuviera una simulación verdaderamente completa de un huracán. Quiero decir, llegando a simular incluso cada uno de los átomos que intervengan en él. Admito que es ir demasiado lejos. Mas espero que estaríais de acuerdo en que tal simulación compartiría con un huracán auténtico toda la estructura abstracta que define la esencia de "huracaneidad". ¿Qué nos prohíbe entonces decir que es huracán?

PACHI: Yo creía que no ibas a insistir más en semejante concepto de igualdad.

SANTI: Y esa era mi intención, pero ahora han vuelto a salir estos ejemplos, y me he visto obligado a retomarlo. Permitidme abandonarlo y volver al pensamiento, que es lo que verdaderamente importa. El pensamiento, en mucha mayor medida que los huracanes, es una estructura abstracta, una forma de expresión de complejos sucesos que se manifiestan en un medio que llamamos cerebro. Pero, en realidad, el acto de pensar puede tener lugar en cualquiera de varios miles de millones de cerebros. Por un lado tenemos toda esta inmensidad de cerebros físicamente distintos, que, por otro, sirven de soporte a una misma cosa: el pensamiento. Lo importante, pues, debe ser la estructura abstracta y no el medio que la soporta. La misma clase de agitación, de turbulencia, de actividad mental, puede tener lugar en cualquiera de estos cerebros, así que nadie puede jactarse de pensar más "genuinamente" que ningún otro. Ahora bien, si pudiéramos dar con un nuevo tipo de medio donde "cultivar" una actividad del *mismo estilo,* ¿podríamos negar que en él se está desarrollando pensamiento?

PACHI: Probablemente no. Pero ahora acabas de cambiar de terreno de juego. Porque la cuestión es: ¿cómo se puede determinar que realmente está produciéndose una actividad del "mismo estilo"?

SANTI: Esa es la belleza del test de Turing. Te *dice* cuándo.

CRIS: No lo veo así, en absoluto. ¿Cómo podrías asegurar que están desarrollándose actividades de igual estilo en el seno del ordenador y en el interior de mi mente? ¿Tan sólo porque sea capaz de responder a preguntas como tal vez yo lo haría? No harías sino detenerte en el exterior de las cosas.

SANTI: ¿Y cómo sabes tú que cuando hablo contigo dentro de *mi mente* está sucediendo algo semejante a lo que llamas pensar? El criterio de Turing es una piedra de toque sensacional, algo así como pueda serlo el acelerador de partículas en física. Creo, Cris, que te gustará la analogía. En física, cuando se requiere averiguar lo que sucede a nivel atómico o subatómico, siendo imposible la observación directa, lo que se hace es bombardear un blanco con partículas y observar su comportamiento al dispersarse. A partir de esta información se infiere la naturaleza interna del blanco. En el fondo, el test de Turing generaliza esta idea, aplicándola a la mente. Considera la mente como un

blanco no directamente observable, pero cuya estructura puede ser deducida por medios más abstractos. Bombardeando con preguntas una mente "objetivo" y observando la "dispersión" de las respuestas podemos saber sobre su estructura interna, como en física.

CRIS: Con más precisión, lo que podremos es formular hipótesis sobre los tipos de estructuras internas que pudieran explicar las conductas observadas, estructuras que pueden o no existir.

SANTI: Espera un momento. ¿Estás diciendo que los núcleos atómicos son meras entidades hipotéticas? Después de todo, su existencia (¿o debería, tal vez, decir su hipotética existencia?) fue demostrada (¿o solamente sugerida?) por el comportamiento de partículas desviadas y esparcidas por los átomos.

CRIS: A mí me parece que los sistemas físicos son mucho más sencillos que la mente y, por ello, la certidumbre de las inferencias que se hagan será correspondientemente mayor.

SANTI: También los experimentos son correlativamente más difíciles de realizar e interpretar. Con el test de Turing podrían realizarse decenas de experimentos muy delicados en sólo una hora. Yo mantengo que las personas reconocemos como tales a las demás sencillamente porque estamos continuamente supervisando el estado de consciencia de éstas, lo que viene a ser, más o menos, someterlas al test de Turing.

PACHI: A grandes rasgos, puede ser cierto. Pero el contacto con personas implica mucho más que meras conversaciones por teletipo. Vemos que las otras personas tienen cuerpo; observamos sus rostros y sus gestos. Vemos que son congéneres humanos, y por eso pensamos que piensan.

SANTI: Creo que le das al pensamiento un enfoque excesivamente antropocéntrico. ¿Quieres decir con esto que estarías más dispuesto a admitir pensamiento en un maniquí de escaparate que en un ordenador maravillosamente programado, tan sólo porque el maniquí remeda mejor la apariencia humana?

PACHI: Evidentemente, para que yo atribuyese la capacidad de pensar a un ente cualquiera haría falta mucho más que una vaga semejanza con la figura humana. Pero esa cualidad orgánica, esa identidad de origen, presta, innegablemente, un grado de verosimilitud que facilita mucho aceptar la idea.

SANTI: Pues no estamos de acuerdo. Lo encuentro, simplemente, demasiado chauvinista. Considero que el elemento clave está en la semejanza de estructura *interna;* no en el sentido de estructura corporal, ni orgánica, ni química, sino en la estructura de la organización, en el *software,* en el soporte lógico del sistema. La determinación de si un ente dado es o no capaz de pensar se me presenta como un problema de averiguar si su organización puede, o no, ser descrita de ciertas formas. Y por mi parte, estoy perfectamente dispuesto a creer que el criterio de Turing permite detectar la existencia o inexistencia de tales modos de organización. Añadiría, incluso, que, al fijarte en mi apariencia física como prueba adicional de que puedo pensar, estás cometiendo una ligereza. Mi opinión es que el test de Turing cala mucho más hondo.

PACHI: ¡Eh, un momento! Ténme un poco más de consideración. No es sólo la *forma* del cuerpo lo que da peso a la idea de que allá dentro se desarrolla pensamiento. Es, como ya dije, el sentimiento de un origen común; es la idea de que tú y yo emanamos ambos de moléculas de ADN muy semejantes. Y a esa idea le confiero mucha importancia. Digámoslo así: la forma externa de los seres humanos revela que éstos comparten una historia biológica profunda, y es *esta profundidad* la que presta muchísima verosimilitud a la idea de que los propietarios de tales cuerpos son capaces de pensar.

SANTI: Todo eso no son más que pruebas indirectas. Sin duda sería preferible alguna clase de comprobación *directa.* Y ese cometido lo cumple el test de Turing. Más aún, yo creo que es el *único* medio de contrastar la capacidad de pensamiento.

CRIS: Pero el criterio de Turing podría también despistarte, lo mismo que el interrogador puede reconocer equivocadamente a la mujer en el hombre.

SANTI: Admito que pudiera engañarme, pero sólo si yo aplicase el test demasiado deprisa o a la ligera. Naturalmente, al aplicarlo pondría mis cinco sentidos, y tantearía con las preguntas más profundas que se me ocurriesen.

CRIS: Me gustaría ver si el programa era capaz de entender los chistes. Esa sí que sería una buena demostración de inteligencia.

SANTI: Estoy de acuerdo. Seguramente, tantear si el programa tiene sentido del humor sería una prueba de fuego para programas supuestamente inteligentes. Para mí valdría lo mismo –si no más– poner a prueba su capacidad emotiva. Así, le preguntaría sobre sus reacciones frente a ciertas piezas musicales u obras literarias, sobre todo las que me son favoritas.

CRIS: ¿Y qué pasaría si contestase "No conozco esa obra", o incluso si te dijese. "No siento interés por la música"? ¿Y si rehuyese toda alusión de carácter emotivo?

SANTI: Me pondría sobre aviso. Si ciertos temas fuesen rehuidos sistemáticamente, yo dudaría mucho de tratar con un ser pensante.

CRIS: ¿Por qué dices eso? ¿Por qué no pensar que estás tratando con un ser pensante, pero desprovisto de emotividad?

SANTI: Has puesto el dedo en la llaga. Estoy convencido de la imposibilidad de divorciar emoción y pensamiento. Dicho de otra forma, estoy convencido de que las emociones son sub-producto automático de la capacidad de pensar; las emociones son una exigencia de la naturaleza misma del pensar.

CRIS: Bueno, ¿y si estuvieras equivocado? ¿Qué pasaría si yo pudiese lograr una máquina capaz de pensamiento, pero no de emoción? Pues que su inteligencia te pasaría desapercibida, porque no fue capaz de superar *tus* criterios, el tipo de test que tú le propusiste.

SANTI:Tendré mucho gusto en ver dónde se encuentra la divisoria entre preguntas con carga emotiva y las desprovistas de ella. Quizá te gustase preguntar a la máquina sobre el significado de una gran novela; responder esto exigiría comprender las emociones humanas. ¿Sería eso pensar, o tan sólo un frío cálculo? Podrías tener interés en consultarle alguna frase sutil, donde fuera importante la elección de las palabras. No te podría responder sin comprender sus matices y connotaciones. En su artículo, Turing se vale de ejemplos como éstos. Podrías pedir a tu máquina consejo sobre alguna intrincada situación amorosa. La máquina tendría que saber muchísimo acerca de las motivaciones humanas y sus raíces. Si fracasara en tareas de este tipo, no me sentiría mínimamente inclinado a admitir que piensa. Por lo que a mí se refiere, la capacidad de pensar, de sentir, y la percepción de la propia consciencia son meras facetas de un mismo fenómeno, y ninguna de ellas puede darse genuinamente sin ir acompañada de las otras.

CRIS: Pero, ¿por qué no se puede construir una máquina incapaz de sentir nada, aunque sí de pensar y de tomar decisiones en situaciones complejas? No veo que haya contradicción.

SANTI: Bueno, yo sí. A mí me parece que al decir eso estás viendo mentalmente una máquina metálica, rectangular, probablemente en una sala climatizada; un objeto frío, anguloso, con un

millón de cables de colores en su interior; una máquina plantada en mitad de un pavimiento de baldosas, haciendo girar sus bobinas de cinta magnética, mientras sisean los ventiladores y martillean los teletipos. Hay máquinas así, capaces de excelentes partidas de ajedrez, lo cual –no tengo reparo en admitirlo– exige tomar buena cantidad de decisiones. Pero nunca me atreveré a llamarla "consciente".

CRIS: ¿Cómo es eso? Para vosotros, los mecanicistas, ¿no tendrán las máquinas de jugar al ajedrez ni siquiera una pizca de consciencia?

SANTI: No para este mecanicista. En mi opinión, la consciencia ha de emanar de una organización configurada según pautas bien precisas, que todavía no sabemos describir con detalle. Pero estoy convencido de que, gradualmente, iremos logrando comprenderla. Desde mi punto de vista, la noción de consciencia exige una cierta forma de reflejo, de reproducción internalizada del universo exterior, juntamente con la capacidad de responder a esa realidad externa basándonos en el modelo internalizado. Pero, además, lo verdaderamente crucial para tener una máquina provista de consciencia es que necesita consciencia, es decir, disponer de un modelo de sí mismo, flexible y bien desarrollado. Y aquí es donde todos los programas existentes, incluidos los más perfectos de los ajedrecísticos, fracasan por completo.

CRIS: ¿Pero no es cierto que los programas de ajedrez miran hacia el futuro desarrollo de la partida? Me imagino que se dicen "Si él mueve aquí, yo iré allí; y si él responde con esto, yo haré aquello..." ¿No es esto una especie de modelo de sí mismo?

SANTI: En realidad, no. Si quieres, sería un modelo extremadamente rudimentario, la comprensión de sí mismo al nivel más reducido. Por ejemplo, un programa de ajedrez no tiene la menor noción de por qué está jugando, ni de qué sea jugar, ni de que es un programa, ni de que está siendo procesado a través de un ordenador, o que tiene un contrincante humano. No tiene sentido de la importancia de ganar o perder, ni de...

PACHI: ¿Cómo sabes *tú* que no tiene tales sentidos? ¿Cómo puedes atreverte a decir lo que un programa de ajedrez sabe o siente?

SANTI: Bueno, ya vale. Todos sabemos que ciertas cosas no saben ni sienten nada. Una piedra, al ir por el aire, nada sabe de parábolas; los ventiladores nada saben de aerodinámica. Es cierto que no *puedo demostrar* estas afirmaciones, pero también es cierto que estamos lindando con artículos de fe.

PACHI: A propósito, ahora recuerdo un cuento sobre dos taoístas que leí en cierta ocasión. Dos sabios se encontraban en un puente, contemplando el fluir las aguas bajo sus pies. Uno dijo: "Desearía ser pez; los peces son muy felices". El otro replicó: "¿Cómo sabes si los peces son felices o no? Tú no eres pez". Y entonces el primero dijo: "Tampoco tú eres yo, así que, ¿cómo puedes tú saber si yo sé o no cómo se sienten los peces?"

SANTI: ¡Magnífico! Al hablar de la consciencia es verdaderamente necesario ser comedidos. De lo contrario, es igualmente fácil subirse al carro del solipsismo (yo soy el único ser consciente del universo) como al de quienes pregonan el panpsiquismo a los cuatro vientos (todo en el universo tiene consciencia).

PACHI: Bueno, ¿y cómo saberlo? Tal vez todos los seres tengan sentido de su propia existencia, tal vez todas las cosas tengan consciencia.

SANTI: Si ahora vas a sumarte a la ralea de quienes postulan que tanto las piedras como los electrones tienen alguna forma de consciencia, tengo la impresión de que nos vamos a despedir ahora mismo. Soy incapaz de comprender semejantes misticismos. Por lo que se refiere a los programas ajedrecísticos, da la casualidad de que conozco cómo funcionan, y puedo asegurarte que en ellos no hay consciencia. No hay nada que hacer.

PACHI: ¿Por qué no?

SANTI: Porque sólo integran en sí el más rudimentario conocimiento de los objetivos del ajedrez. La noción de jugar se transforma en el acto mecánico de comparar entre sí una larga serie de números, y elegir sistemáticamente el más alto. Un programa de ajedrez no sufre la vergüenza de perder ni goza del orgullo de vencer. Su modelo de sí mismo es muy burdo. Sale adelante a base de hacer lo menos que puede, lo justo para jugar la partida, y nada más. Empero, es bastante interesante nuestra tendencia a hablar de los "deseos" de estos autómatas. Decimos, por ejemplo, "se propone proteger su rey con una hilera de peones" o "le gusta poner en juego sus torres cuanto antes", o "este cacharro se cree que no me he dado cuenta de que busca un jaque doble".

PACHI: Es verdad; a nosotros nos pasa lo mismo con los insectos. Encontramos una hormiga solitaria en algún sitio, y decimos "está intentando regresar a casa" o "quiere arrastrar esa abeja muerta hasta el hormiguero". Y, en realidad, al referirnos a un animal cualquiera empleamos términos que indican emociones, pese a que no estamos nada seguros de cuánto puedan ser capaces de sentir estos animales. No creo que haya dificultad en decir que perros o gatos están alegres o tristes, que tengan deseos e incluso convicciones; aunque, desde luego, no creo que su tristeza sea ni tan profunda ni tan compleja como la tristeza de los humanos.

SANTI: De todas formas, no la llamarías tristeza "simulada", ¿verdad?

PACHI: No, claro, que no. A mí me parecen auténticas.

SANTI: Cuesta mucho evitar el uso de términos mentalistas y teleológicos. Y tengo la impresión de que su uso está perfectamente justificado, siempre que se tenga prudencia y no se los aplique a casos extremos. Sencillamente, su riqueza de contenido es muy distinta al aplicarlos a los programas ajedrecísticos de nuestros días que al aplicarlos a personas.

CRIS: Todavía no veo por qué la inteligencia ha de conllevar emoción. ¿Por qué no podemos imaginar una inteligencia que se limita a razonar y calcular, pero que no experimente sentimientos?

SANTI: Tengo un par de respuestas a esa cuestión. Ante todo, toda inteligencia ha de tener motivaciones. Crea la gente lo que quiera, no es cierto que las máquinas puedan razonar más objetivamente que las personas. Una máquina, al observar una situación, tiene que encuadrarla y filtrarla, hasta reducirla y acomodarla a ciertas categorías preconcebidas, al igual que suelen hacer las personas. Ello implica tomar nota de ciertas cosas, y dejar otras completamente de lado, darle más peso a unos aspectos que a otros. Y así ocurre a todos los niveles del procesamiento de información.

PACHI: No estoy seguro de entenderte del todo.

SANTI: Fíjate en mí, por ejemplo. Podría pensarse que ya que estoy haciendo consideraciones de carácter puramente intelectual no tengo necesidad de emoción alguna. Pero, ¿por qué me *interesan* este tipo de consideraciones? ¿Por qué he puesto tanto énfasis en la palabra *interesan*? Porque en esta conversación estoy tomando parte emotivamente. Las personas se hablan unas a otras movidas por convicciones, no por reflejos automáticos, vacíos de emoción. Incluso la conversación más intelectual está inspirada por pasiones subyacentes. Toda conversación conlle-

va una segunda corriente emotiva, subterránea. El hecho es que quienes hablan desean ser escuchados y comprendidos, y, además, respetados por lo que dicen.

PACHI: A mí, todo lo que estás diciendo me suena a que la gente necesita sentir interés por lo que se está diciendo; de lo contrario, la conversación languidece y muere.

SANTI: Exacto. Yo no me tomaría la molestia de hablar con nadie, si no me moviera algún interés. Y la palabra interés no es más que un nombre que encierra toda una constelación de pulsiones inconscientes. Cuando hablo, todas mis pulsiones operan en sincronía, y lo que se percibe a nivel "de superficie" es mi personalidad, mi estilo. Pero ese sentido es resultante de un número inmenso de minúsculas prioridades, pulsiones, tendencias. Y al sumar los efectos de un millón de ellas, interfiriéndose mutuamente, el resultado macroscópico es una multitud de *deseos.* Todo se suma, sencillamente. Y esto me lleva al otro aspecto, al de la posibilidad de cálculo sin sentimiento. Sin duda, existe –en una caja registradora, en una calculadora de mano– e incluso me atrevo a pensar que en todos los actuales programas de ordenador. Pero eventualmente, ensamblando de modo idóneo un gran número de cálculos desprovistos de sentimiento en una magna estructura bien coordinada, se obtendrá un sistema con propiedades cualitativamente diferentes, a otro nivel. Podrás entonces ver el sistema –en realidad, te encontrarás *obligado* a verlo– no como un aglomerado de pequeños cálculos, sino como una organización de tendencias, deseos y creencias. Cuando las cosas alcanzan estados de suficiente complejidad, nos vemos forzados a cambiar de nivel nuestra descripción. Hasta cierto punto ya está ocurriendo así, y por eso nos vemos en la necesidad de emplear términos como "querer", "pensar", "tratar de", "esperar" y otros por el estilo, al referirnos a programas ajedrecísticos y demás tanteos de pensamiento mecánico. Es una conmutación de nivel descriptivo, un salto cualitativo en el discurso. Dennett lo expresa diciendo que el observador pasa a adoptar una actitud "intencional". En inteligencia artificial solamente podrán empezar a ocurrir cosas interesantes cuando se logre que los programas adopten, *con respecto a sí mismos,* una actitud intencional.

CRIS: Serán, sin duda, sistemas realimentados harto curiosos, al tener bucles de retorno entre distintos niveles.

SANTI: Desde luego que sí. Claro, hoy por hoy creo que sería demasiado prematuro adoptar una actitud intencional con respecto a los programas disponibles. Al menos, esa es mi opinión.

CRIS: Yo creo que hay otra cuestión importante, relacionada con ésta. ¿Hasta qué punto podemos asumir válidamente una actitud intencional hacia otros seres, humanos aparte?

PACHI: Yo no dudaría en asumirla para referirme a los mamíferos.

SANTI: Voto a favor.

CRIS: Hombre, esto es interesante. ¿Cómo podrá ser eso, Santi? No creo que puedas admitir en serio que haya perros y gatos capaces de salir airosos del test de Turing. Mas, por otra parte, ¿no has dicho que el test de Turing es la única forma de contrastar la presencia de pensamiento? ¿Cómo logras sostener estas dos creencias simultáneamente?

SANTI: Humm... De acuerdo... Me imagino que tendré que admitir que el test de Turing sólo puede ser significativo por encima de un cierto mínimo de consciencia. Pudieran existir seres pensantes que, sometidos al test, no consiguieran superarlo. Pero, por otra parte, en mi opinión, todo ser capaz de superarlo sería genuinamente pensante y consciente.

PACHI: ¿Y eres capaz de considerar consciente a un ordenador? Pido disculpas si lo que voy a decir suena a tópico, pero cuando pienso en seres conscientes me es imposible visualizar imágenes de máquinas. A mí, "seres conscientes" me sugieren cuerpos tibios, blandos, suaves, por estúpido que pueda parecer.

CRIS: Verdaderamente, sí que es curioso oírle decir una cosa así a un biólogo. Cuando os referís a la vida, ¿no procuráis hacerlo desde un enfoque lo más físico-químico posible, y desvanecer así toda noción mágica?

PACHI: No del todo. A veces, la física y la química del problema no hacen sino reforzar la impresión de que algo mágico está ocurriendo allí. Además, no siempre soy capaz de integrar mis conocimientos científicos con el sentir de mis entrañas.

CRIS: A mí me ocurre tres cuartos de lo mismo.

PACHI: Así que, veamos Santi, ¿cómo te las vas a arreglar para convencer a gente con prejuicios tan arraigados como los nuestros?

SANTI: Tratando de traspasar la superficie de vuestras ideas sobre las máquinas, para atacar las presunciones de carácter intuitivo agazapadas tras ellas, y que, aunque ocultas, están influyendo poderosamente en vuestras opiniones. Tengo la impresión de que todos conservamos de las máquinas clichés e imá-

genes residuales de la revolución industrial. Vemos las máquinas como engendros de acero, marchando a sacudidas por obra y gracia de émbolos y calderas resoplantes. Puede que fuera de este modo como el inventor de la computadora mecánica, Charles Babbage, veía a las personas. Al bautizar su invento, que funcionaba por engranajes, lo bautizó "motor analítico".

PACHI: Bueno, pero yo tengo la certeza de que las personas no son máquinas de vapor –como pensaba Babbage– y, ni siquiera, abrelatas eléctricos. Las personas tienen algo que..., que..., una especie de *llama* interior, algo vivo, que vacila, que titila, que parpadea imprevisiblemente. Algo oscilante, incierto, pero *creativo*.

SANTI: Magnífico. Es lo que estaba deseando oír. Esa forma de pensar es muy humana. Tu metáfora de la llama me ha sugerido velas, fogatas..., me hace ver tormentas y relámpagos cruzando el cielo. Pero, ¿te has fijado en el aspecto que ofrece la consola de un ordenador? Los guiños y parpadeos de los indicadores forman pautas luminosas de aspecto caótico. ¡Cuánto dista esa imagen del chirriar y golpear de las máquinas tradicionales, verdaderos montones de chatarra! Y es que el pupitre de control de un ordenador flamea. ¿Por qué la palabra máquina no conjura en nosotros imágenes de luces saltarinas, en lugar de sugerirnos gigantescas excavadoras mecánicas?

CRIS: ¡Vaya metáforas más vívidas, Santi! Casi has hecho cambiar mi noción de mecanismo; quizás ahora ya no tienda tanto a fijarme en su materia como en su organización. Has logrado que intentase visualizar los pensamientos de mi mente –incluso los que estoy teniendo ahora mismo–. Son como una enorme nube de un pulverizador, titilando en minúsculos impulsos en mi cerebro.

SANTI: Tu nebulizador de impulsos titilantes nos ha proporcionado un autorretrato muy poético.

CRIS: De todas formas, no estoy, ni mucho menos, convencida de ser sólo una máquina. Admito que mis ideas sobre las máquinas puedan sufrir de anacronismos más o menos inconscientes, pero tengo la impresión de que no voy a poder cambiar de repente ideas tan arraigadas.

SANTI: Al menos, tampoco te cierras en banda. Y para serte sincero, una parte de mí mismo simpatiza con vuestros puntos de vista sobre las máquinas. Hay un rincón de mi ser que se niega rotundamente a admitir que es parte de una máquina. La idea de que un sentimiento como la conciencia del propio yo pueda emerger de una intrincada red de circuitos resulta muy chocante. ¿Os sorprende lo que digo?

CRIS: Desde luego, *a mí* sí. Dinos entonces: ¿*crees* tú en la posibilidad de ordenadores inteligentes, sí o no?

SANTI: Depende de lo que pretendas decir con tu pregunta. Todos hemos oído preguntar: "¿pueden pensar las máquinas"? Hay varias interpretaciones posibles (aparte de las muchas que admite el verbo "pensar"); todas ellas giran en torno a las palabras "poder" y "ordenador".

PACHI: Y así, volvemos a los juegos de palabras.

SANTI: Es cierto. Ante todo, la pregunta de Cris podría significar, "¿Existe hoy, en este momento, algún ordenador que piense?". A eso, me atrevo a responder taxativamente que no. La pregunta podría significar, también, "¿Podría alguno de los ordenadores actuales, convenientemente programado, llegar a pensar?". Tal cosa sería algo menos inverosímil, aunque yo seguiría contestando "probablemente, no". La verdadera dificultad reside en el concepto de "ordenador". A mí me parece que "ordenador", o "computadora" o "sistema de proceso de datos" hacen pensar en la imagen que ya antes describí: salas de aire acondicionado, con diversas cajas rectangulares distribuidas por ella. Confío en que el progreso de la arquitectura del ordenador llegue a dejar pasada de moda semejante visión.

PACHI: ¿No te parece que los ordenadores seguirán, durante algún tiempo, en torno a nosotros con la forma en que hoy los conocemos?

SANTI: Sin duda, así sucederá durante bastante tiempo; pero los ordenadores más avanzados –que quizá, para entonces no se llamen ordenadores– seguirán evolucionando, y se harán muy diferentes de los actuales. Seguramente, al igual que ha ocurrido con los seres vivos, su árbol evolutivo se abrirá en muchas ramas. Habrá ordenadores comerciales, ordenadores para uso escolar, para cálculo científico; y otros para desarrollo de sistemas, para naves espaciales..., y, finalmente, habrá ordenadores para el estudio de la inteligencia. En realidad, solamente me interesan éstos, que serán los más flexibles, donde los proyectistas se esforzarán al máximo para hacerlos todo lo inteligentes que sea posible. Y no veo ninguna razón para que tales máquinas sigan encorsetadas en su apariencia tradicional. Es probable que pronto sean dotadas de algunos rudimentarios órganos sensorios; al principio, y sobre todo, visión y audición. Después, necesi-

tarán poder moverse, explorar, actuar. En resumen, tendrán que hacerse más autónomos, más semejantes a animales.

CRIS: No es por nada, pero me estás recordando a los androides R2D2 y C3PO de la *Guerra de las Galaxias*.

SANTI: Pues no estaba pensando en nada así. Esos androides son demasiado absurdos, fruto de la imaginación de los diseñadores cinematográficos. No quiero decir con esto que tenga perfectamente claras mis propias ideas. Pero sí creo necesario ir más allá de la imagen estereotipada que hoy tenemos de nuestros ordenadores, si es que hemos de imaginar con algún realismo sus posibilidades. La única cosa que las máquinas tendrán siempre en común será su mecanicidad subyacente. Quizás esto suene demasiado frío e inflexible, pero, ¿qué hay de más mecánico –y lo digo consciente de su aspecto maravilloso– que el funcionamiento de los enzimas y del ADN de nuestras células?

PACHI: Lo que suceda en el interior de nuestras células tiene, para mí, connotaciones húmedas y viscosas; mientras que el interior de las máquinas me sugiere sequedad y rigidez. Quizás esto tenga que ver con el hecho de que los ordenadores no cometen errores, sólo hacen lo que se les manda hacer. Por lo menos, así es como yo me lo imagino.

SANTI: ¿No es gracioso? Hace un momento estabas hablándome de llamas; ahora, de humedad y viscosidad. ¿No es formidable lo contradictorios que podemos ser?

PACHI: Me ha parecido percibir un leve matiz sarcástico.

SANTI: Nada de sarcasmos; sencillamente, me parece maravilloso.

PACHI: Bueno, sólo era un ejemplo de la escurridiza naturaleza de la mente humana, de la mía, por lo menos.

SANTI: Cierto, pero la imagen que nos presentas de los ordenadores se ha vuelto a atascar en las rodadas del camino, de tan trillado que está. Los ordenadores *sí* pueden cometer errores, y los cometen. Conste que no me refiero a errores a nivel de soporte físico, de *hardware,* que más serían averías. Piensa en cualquiera de los ordenadores empleados en previsión meteorológica. Pueden hacer predicciones totalmente equivocadas, a pesar de que su programa funcione impecablemente.

PACHI: Porque se les habrán suministrado datos erróneos.

SANTI: Nada de eso. La causa está en que la tarea de predicción meteorológica es demasiado compleja. Todo programa de esta naturaleza tiene que apañárselas con una cantidad de información necesariamente limitada –aunque totalmente correcta, por otro lado– y, a partir de ella, efectuar extrapolaciones e inferencias. A veces dará predicciones erróneas. El caso no es muy diferente del campesino que mira al cielo y pronostica "me parece que esta noche vamos a tener algo de nieve". Nos hacemos modelos mentales de las cosas, y después nos servimos de ellos para predecir el comportamiento del mundo. Por imprecisos que puedan ser, tenemos que arreglárnoslas con ellos: si resultan demasiado inexactos, la evolución se encarga de borrarnos del planeta, o nos caemos por un precipicio, o algo así. A los ordenadores les ocurre lo mismo. Ahora, sencillamente, lo que va a pasar es que los proyectistas humanos acelerarán el proceso evolutivo, pues ambicionan explícitamente la creación de inteligencia, mientras que si la naturaleza atinó con ella fue de pura chiripa.

PACHI: Por tanto, tú confías en que al hacerse más inteligentes los ordenadores cometan cada vez menos errores.

SANTI: Pues no; creo que sucederá exactamente lo contrario. Cuanto más perspicaces sean, tanto más serán utilizados en desenredar complejos problemas de la vida real, con lo que cada vez será más verosímil que los modelos de que dispongan sean inexactos. Para mí, cometer errores es signo de inteligencia.

PACHI: Chico, a veces me dejas helado.

SANTI: Ya me imagino que como abogado defensor de la inteligencia artificial no soy muy ortodoxo. Me hago cargo de que, en cierto modo, ni siquiera acabo de tomar partido. Tengo el sentimiento de que las máquinas no podrán ser verdaderamente inteligentes, a la manera humana, mientras no tengan algo así como la humedad y la viscosidad biológicas. Al decir viscosidad no me refiero a un sentido *literal;* su viscosidad podría estar en el soporte lógico. Pero tanto si toman apariencia biológica, como si no, las máquinas, por inteligentes que sean, nunca dejarán de ser máquinas. Seremos nosotros quienes las hayamos proyectado, construido..., o criado. Podremos comprender cómo funcionan, al menos en un cierto sentido. Posiblemente no haya una sola persona capaz de comprenderlas por completo; pero, colectivamente, sí sabremos cómo funcionan.

PACHI: Mira, no se puede estar en misa e ir en procesión.

SANTI: Seguramente tienes razón. Lo que trato de explicar es que cuando se logre la inteligencia artificial, habrá de ser a un tiempo orgánica y mecánica. Habrá de tener la misma prodigiosa flexibilidad que vemos en los mecanismos de la vida. Y al decir mecanismos, hablo *en sentido estricto.* Los ácidos nucleicos, los enzimas, etcétera, *son,* en realidad, mecánicos, rígidos, fiables. ¿Estás de acuerdo, Pachi?

PACHI: ¿Qué otro remedio me queda? Pero al actuar conjuntamente, suceden montones de cosas imprevistas. Es tanta la complejidad de comportamiento, y son tan variadas sus formas, que toda esta mecanicidad se traduce luego en algo muy ambiguo.

SANTI: A mí, la transición del nivel físico-químico, molecular, al nivel celular, vital, me resulta casi inimaginable. Pero eso justamente es lo que me convence de que las personas somos máquinas. Es un pensamiento incómodo en ciertos aspectos pero, en otros, muy vivificante.

CRIS: Si las personas son máquinas, ¿por qué resulta tan difícil convencerlas de ello? Sin duda, si nosotros fuésemos máquinas deberíamos ser capaces de reconocer nuestro carácter maquinal.

SANTI: Es preciso no olvidar los componentes emocionales. Si te dicen que eres una máquina, en cierto modo te están diciendo que no eres más que la reunión de tus componentes materiales, y ello te obliga a enfrentarte con tu naturaleza efímera, mortal. A nadie le resulta fácil mirar de frente esta idea. Pero, dejando aparte esta objeción emocional, para vernos a nosotros mismos en tanto que máquinas es preciso recorrer el camino completo desde el nivel mecánico más elemental hasta niveles donde se desarrollan actividades de complejidad semejante a las vitales. Cuando el número de etapas intermedias es muy grande, actúan a modo de pantalla, y la cualidad mecánica se hace invisible. Creo que, de llegar las máquinas inteligentes, así será como nosotros las veamos, y como se verán ellas ¡a sí mismas!

PACHI: En una conferencia oí algo muy gracioso acerca de lo que sucederá cuando lleguemos a disponer de máquinas inteligentes. Al implantar su inteligencia en los dispositivos que deseáramos controlar, su conducta dejaría de ser predictible.

SANTI: A lo mejor tendrían en su interior una especie de vacilante llamita. ¿No?

PACHI: Sí, tal vez.

SANTI: Y, ¿qué tiene esto de gracioso?

PACHI: Imagínate, por ejemplo, los misiles militares. Según esta idea, cuanto más perfeccionados sean sus ordenadores de persecución del blanco, tanto menos seguro pudiera ser que lo alcanzasen. En el límite, podríamos tener

misiles que optaran por hacerse pacifistas, y retornasen, tranquilamente, a sus bases, tomando tierra sin hacer explosión. Podríamos tener incluso balas inteligentes que, no deseando suicidarse, se diesen la vuelta a medio vuelo.

SANTI: Una idea encantadora.

CRIS: Siento seguir muy escéptica sobre todo este asunto. De todas formas, Santi, me gustaría oír cuáles son tus predicciones respecto de cuándo llegarán a ser realidad estas máquinas tan inteligentes.

SANTI: Lo más seguro es que durante mucho tiempo no podamos ver nada ni remotamente parecido a una inteligencia de nivel humano. Nuestra inteligencia descansa sobre un substrato demasiado –espantosamente– complicado, el cerebro, para que nosotros seamos capaces de duplicar sus estructuras en un tiempo previsible. Al menos, esa es mi opinión.

PACHI: ¿Crees que algún día se lograrán programas capaces de salir airosos del test de Turing?

SANTI: Preguntas algo muy difícil de contestar. Me imagino que el test podrá ser realizado a varios niveles de dificultad y, por tanto, superado en otros tantos grados. No es cuestión de blanco o negro. Para empezar, dependerá de quién interrogue. Hay personas muy cándidas, a quienes algunos programas actuales podrían ya burlar. Pero, sobre todo, depende de la profundidad permisible en las preguntas.

PACHI: Podríamos tener entonces toda una escala de tests de Turing; versiones de un minuto, de cinco minutos, de una hora... ¿No sería interesante que algún organismo oficial patrocinara concursos periódicos –algo así como los que anualmente se celebran para programas ajedrecísticos– para ver si hay programas capaces de superar el test de Turing?

CRIS: Por ejemplo, el programa que resistiera más tiempo frente a un jurado de personalidades de la cultura podría ser el vencedor anual. Podría pensarse en un premio sustancioso para el primer programa capaz de pegársela a algún intelectual famoso durante cierto tiempo: diez minutos, por ejemplo.

PACHI: ¿Y qué quieres que haga el programa con el premio, eh?

CRIS: Vamos, hombre, si el programa es capaz de torear a los jueces, seguro que sabrá sacarle partido al premio.

PACHI: Claro..., sobre todo si el premio consiste en pasar la noche fuera de casa, bailando con el jurado.

SANTI: Bueno, en serio, a mí sí que me gustaría que se instituyese un premio así. Y, sin duda, sería gracioso ver cómo los primeros programas hacían el más patético de los ridículos.

PACHI: ¿Eres muy escéptico, verdad? Bueno, ¿te parece que alguno de los programas de nuestros días sería capaz de salir adelante en un test de cinco minutos, enfrentado a un interrogador culto e inteligente?

SANTI: Lo dudo muy en serio. En parte, ello puede obedecer a que no tenemos a nadie trabajando específicamente con este fin. De todas formas, he de decir que sí hay un programa cuyos inventores declaran que ha superado ya una versión rudimentaria del test. Lo han bautizado Parry, y parece que ha conseguido despistar a varios psiquiatras en pruebas realizadas a distancia. A los psiquiatras se les dijo que su interlocutor podría ser bien un ordenador, bien un individuo paranoico. El programa del que te hablo es versión perfeccionada de otro anterior. En el viejo, a los comecocos se les daban únicamente breves transcripciones de entrevistas hipotéticas, debiendo entonces determinar cuáles correspondían a auténticos paranoicos y cuáles al ordenador.

PACHI: ¿Sin posibilidad de hacer preguntas? Claro, eso crea una dificultad muy seria; además, tampoco parece corresponder a la intención del test de Turing. Imagínate que alguien tuviera que averiguar si soy hombre o mujer dándole tan sólo unas pocas frases mías por escrito. Sería realmente difícil. Me alegro de que hayan podido perfeccionar el procedimiento.

CRIS: ¿Y cómo se hace para que un ordenador se comporte como un paranoico?

SANTI: No he dicho que actuase *realmente* como un paranoico, sino, tan sólo, que unos cuantos psiquiatras lo creyeron así tras pruebas realizadas en circunstancias muy distintas de las habituales. Una de las cosas más fastidiosas del pseudo-test de Turing que estamos comentando es la forma en que funciona Parry. "El", así dijeron los médicos, "actúa de forma paranoide, porque en el transcurso de la conversación se pone bruscamente a la defensiva cada vez que se tocan ciertos temas, al parecer inaceptables". Y de hecho, su sistema de control interno impide que nadie pueda verdaderamente ponerlo a prueba. Por ese motivo, hacer una simulación de un paranoico es mucho más fácil que suplantar a un individuo normal.

PACHI: No me cabe ninguna duda. Esto me recuerda el chiste que pregunta cuál es el tipo de persona más fácil de simular mediante ordenador.

CRIS: ¿Y cuál es?

PACHI: Los psicópatas catatónicos. Pueden pasarse días enteros sin moverse. Yo misma podría redactar un programa capaz de hacerse pasar por uno de ellos.

SANTI: Uno de los aspectos curiosos de Parry es que no construye por sí mismo ninguna frase. Dispone de un enorme repertorio de frases "enlatadas", limitándose a seleccionar la que mejor se acomoda a la pregunta que le hacen.

PACHI: ¡Sorprendente! Aunque quizá no quepa hacer lo propio a gran escala, ¿o sí?

SANTI: No, por supuesto. El número de frases que sería necesario almacenar para responder con naturalidad en el curso de una conversación es astronómico, verdaderamente inimaginable. Y para poderlas localizar en la memoria sería necesario un complejísimo sistema de clasificación e indexación. Si alguien sostiene que es posible preparar un programa capaz de salir airoso del test de Turing a base de ir sacando frases prefabricadas –algo así como un cambiadiscos automático– bueno, por decirlo amablemente, creo que no lo ha meditado mucho. Lo más gracioso es que ciertos enemigos de la inteligencia artificial recurren a este tipo de programa irrealizable para atacar la noción de test de Turing. En lugar de máquinas verdaderamente inteligentes pretenden hacernos ver una especie de robot gigantesco y renqueante, que va entonando una letanía de frases hechas, con fastidiosa monotonía. Se supone que todos podríamos percibir sin dificultad su nivel de funcionamiento mecánico, aun cuando al mismo tiempo estuviera realizando tareas que no dudaríamos en calificar de lúcidas, originales o inteligentes. Entonces los críticos dirían: "Pero ya lo ven todos ustedes. No es más que un dispositivo mecánico; de ninguna forma podemos decir que sea inteligente". Y yo, en cambio, lo veo casi totalmente al revés. Si me mostrasen una máquina capaz de hacer lo mismo que yo, capaz de pasar el test de Turing, creo que en lugar de sentirme insultado sentiría deseos de unirme al filósofo Raymond Smullyan, para cantar con él a dúo, "Ved cuán maravillosas son las máquinas".

CRIS: Si durante el test de Turing te dieran la oportunidad de hacerle al ordenador una sola pregunta, ¿qué le dirías?

SANTI: Humm...

PACHI: Creo que yo lo sé. A ver qué os parece ésta: "Vamos a ver, si durante la realización de un test de Turing tuviera usted oportunidad de hacerle al ordenador una única pregunta, ¿qué le diría?".

Taller y laboratorio

Fosfeno: falsa sensación luminosa producida por un estímulo mecánico del globo ocular

Jearl Walker

Si el lector mantiene, durante un minuto o menos, el dedo índice presionando suavemente sobre un párpado cerrado, es muy probable que comience a ver fosfenos. Reciben ese nombre los contornos y colores que evolucionan en nuestro campo visual cuando éste se sume en la oscuridad. Pueden aparecer también bajo una luz parpadeante, en la oscuridad y cuando accidentalmente nos golpeamos la cabeza. A veces basta con cerrar los ojos apretadamente para verlos. Todavía guardo el recuerdo infantil de cómo reparé en ellos: llorando con la cabeza hundida en la almohada.

De los fosfenos, entre otros múltiples temas, se ocupó, hace un siglo, Hermann von Helmholtz. Dedicaré esta sección a algunas experiencias que recoge su *Tratado de Optica Fisiológica.* Trataré además de algunos experimentos recientes de Christopher W. Tyler, del Instituto Smith-Kettlewell de Ciencias de la Visión, de San Francisco. Al repasar aquellos trabajos me he sentido tentado a hacer experiencias con fosfenos. Les detallaré algunas observaciones propias. Interesantes, en realidad, son las observaciones de todo el mundo, pues no todos ven los mismos tipos de fosfenos. Antes de proseguir, permítame el lector prevenirle expresamente contra posibles lesiones. Si al apretar los ojos, le duelen, abandone la experiencia. Además, aunque no duela, la compresión no debe prolongarse más de un minuto. No hay que mirar fijamente luces intensas. Si, con los párpados cerrados, duelen los ojos al dirigir la vista hacia una luz intensa, también se abandonará la experiencia. Los fosfenos no valen el menor daño que pueda sufrir nuestra vista.

Helmholtz recogió algunas observaciones realizadas por los primeros investigadores que se ocuparon del tema, particularmente las efectuadas por Johannes Purkinje en 1819. Pero Helmholtz también experimentó por su cuenta. Señaló, así, que aplicando una presión constante sobre un punto del ojo, aparecía un fosfeno en el lado opuesto del campo visual. Por ejemplo, al apretar un ojo cerrado por la parte más próxima a la sien, se originaba un fosfeno que se apreciaba con nitidez en la zona próxima a la nariz; poseía un centro luminoso rodeado de un anillo oscuro y otro anillo luminoso, exterior.



Generación de fosfenos por compresión con el dedo

El fosfeno perdía luminosidad cuando Helmholtz miraba hacia la izquierda, con el ojo derecho cerrado. No consiguió que se solapara completamente con la visión foveal. (La fóvea es una diminuta zona de la retina donde es más denso el agrupamiento de conos. Cuando miramos directamente un objeto, la imagen se forma en la fóvea.)

En otro ensayo se miró fijamente a la nariz con el ojo derecho, mientras sostenía una hoja de papel blanco delante de la cara. El papel hacía las veces de superficie difusora y uniformemente iluminada. Luego, presionó su párpado derecho por la parte próxima a la sien, poniendo atención en que el dedo quedara situado, aproximadamente, en la mitad del globo ocular y apuntando hacia arriba.

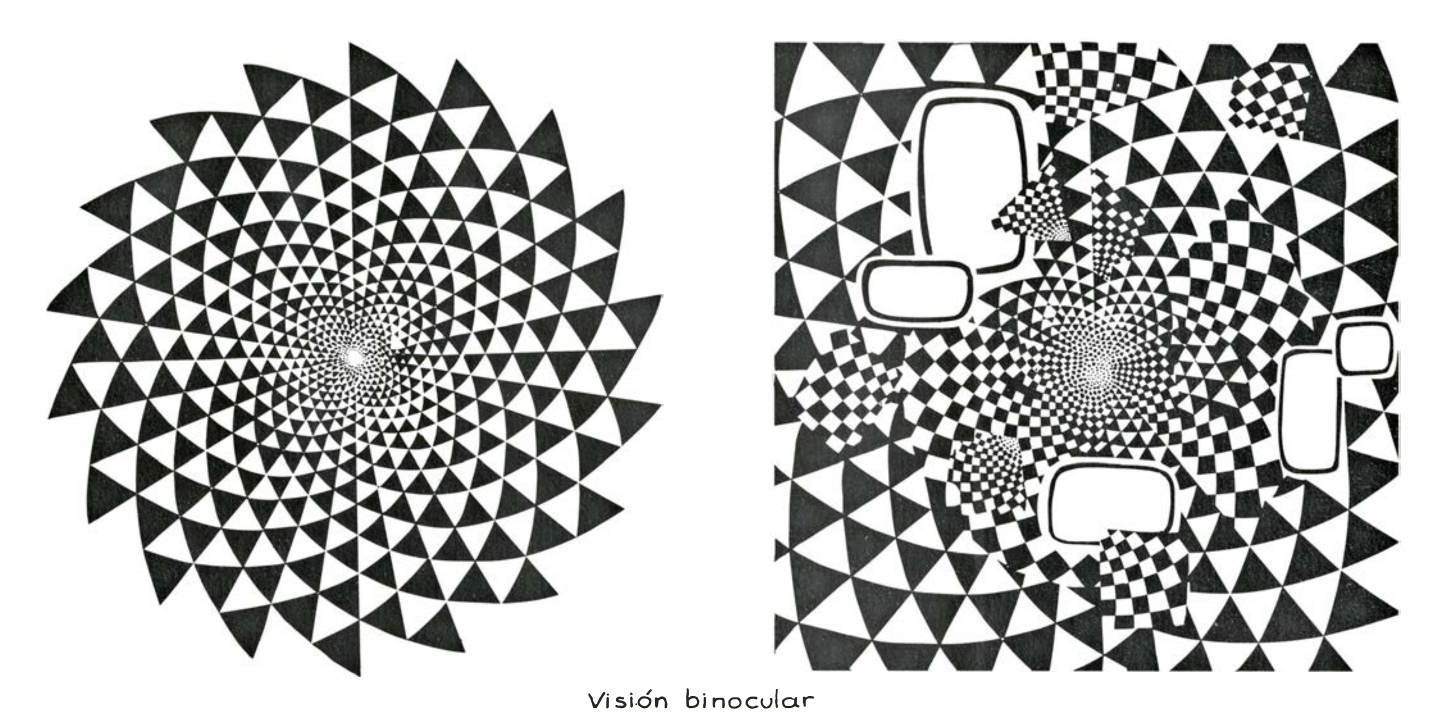
El fosfeno, que apareció en la zona del campo visual más próximo a la nariz, se componía de una mancha oscura rodeada de una franja curva luminosa; a la izquierda de ésta se veían unas bandas delgadas y oscuras. En el punto visual correspondiente a la fóvea había una zona de tono gris apagado. Más a la derecha, en la zona correspondiente al punto en que el nervio óptico penetra en la retina, había otra mancha oscura e imprecisa. Cuando Helmholtz repitió la experiencia, utilizando un fondo oscuro en vez de papel iluminado, la disposición de las imágenes de fosfenos resultó la misma, pero con las zonas luminosas y oscuras intercambiadas. No aparecía la sensación de un fosfeno en la visión foveal.

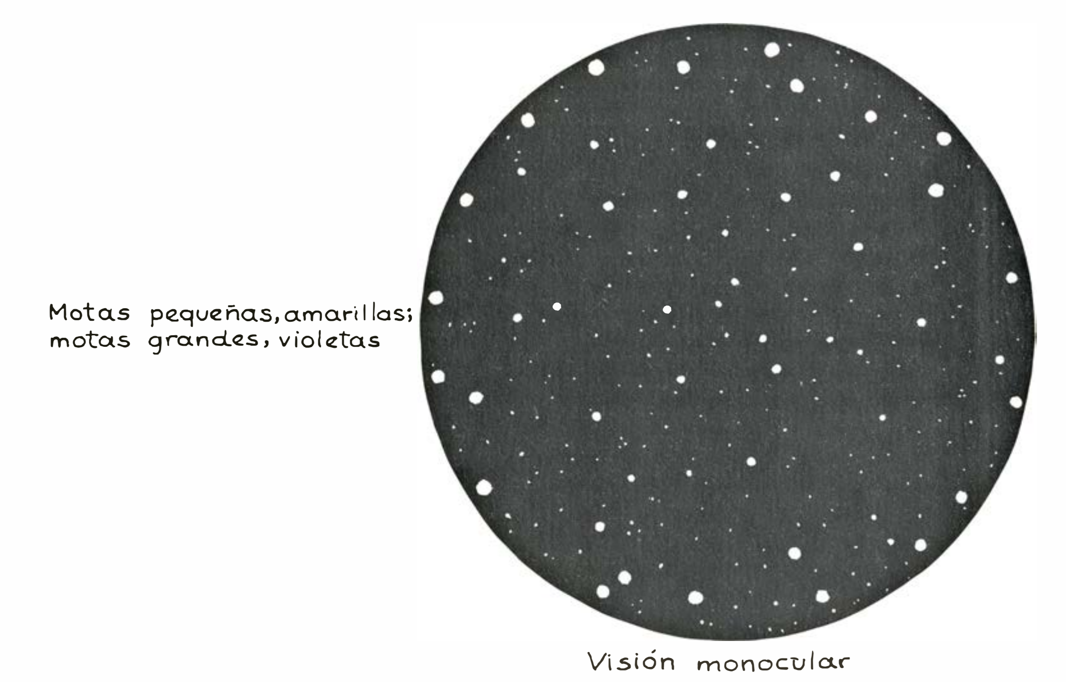
Al repetir personalmente estas experiencias iluminé mi campo visual utilizando la difusión producida por la pantalla de un proyector de diapositivas. Empecé cerrando el ojo izquierdo y manteniendo abierto el derecho. Mediante un leve toque sobre la parte del párpado derecho más cercana a la sien, me resultó fácil crear un fosfeno en la zona de mi campo visual más próxima a la nariz. Me dio la impresión de que tenía un color púrpura o azul oscuro.

No logré identificar tan fácilmente una estructura como la descrita por Helmholtz. En la zona foveal de mi campo visual había una pequeña mancha gris rodeada de una zona más luminosa; a la derecha aparecía una zona gris de forma similar a la de una punta de flecha que señalara hacia la zona foveal. Me resultaba más fácil observarlo si de vez en cuando variaba la presión que ejercía sobre el párpado; al hacerlo, el fosfeno de la nariz y la mancha luminosa de la fóvea oscilaban horizontal y desacompasadamente entre sí.

La imagen fosfénica puede complicarse con una presión más prolongada y fuerte sobre un ojo cerrado. El campo visual aparece entonces cruzado por formas y colores que flotan de un modo abigarrado; estas figuras son luminosas, coloreadas y en continua variación. Purkinje escribió que el "fondo se componía generalmente de cuadrángulos delgados dispuestos de una manera regular, sobre los que había estrellas de ocho rayos, o bien rombos oscuros o luminosos de diagonales verticales y horizontales; además, los dibujos aparecían rodeados de franjas alternativamente luminosas y oscuras".

Helmholtz no observó tanta regularidad. Comparó las imágenes con finos pétalos y con superficies musgosas. En ocasiones le parecían enrevesados laberintos. Muchas veces, chispas luminosas azules o verdes cruzaban la imagen como rayos. Incluso cuando aflojaba la presión, con el ojo aún cerrado, la imagen persistía un tiempo. Al abrir el ojo, tras aflojar la presión, no veía nada en un principio. Luego, los objetos más luminosos de su campo visual se hacían brillantes y, superpuesta a éstos, seguía percibiendo parte de la imagen de fosfenos, pero entonces las zonas lumino-





Fosfenos producidos por compresión intensa, descritos por Christopher W. Tyler

sas y oscuras aparecían invertidas. Su visión terminaba por recobrar la normalidad.

Algunos experimentadores han informado que observan una imagen de la red circulatoria de la retina al apretarse un ojo cerrado con el dedo. Helmholtz, manifiestamente incapaz de repetir la observación, se mostró escéptico acerca de la intervención de la red retiniana. No obstante, hay personas que sí la ven. Así, W. A. Nagel, que redactó notas a pie de página para el *Tratado* de Helmholtz, observó que le resultaba fácil ver "una densa red de líneas luminosas sobre fondo oscuro" cuando mantenía un ojo cerrado durante 20 minutos como mínimo; no le era necesario apretar. Una vez que las líneas aparecían, podía distinguir en ellas como un trémolo, cabe presumir que debido al pálpito de la sangre en los capilares de la retina.

Cuando aprieto el ojo con alguna fuerza, se me empaña la visión y la zona foveal del campo visual se anima con trazos palpitantes. Ello se debe probablemente a que de esa forma perturbo la circulación de la sangre por la fóvea y, en consecuencia, lo que veo es una imagen palpitante que pone de manifiesto su red circulatoria. La red retiniana se extiende por delante de los fotorreceptores y, por ello, produce sombras sobre partes de la retina. Normalmente, el cerebro ignora esas sombras porque son invariantes. De manera consciente, sólo percibimos escenas que varían continuamente, sea porque los objetos se mueven, o porque nuestros ojos exploran la escena. Pero si se perturba la circulación retiniana, podrá observarse, aunque de modo impreciso, la configuración de la red.

Los fosfenos se presentan también cuando giramos rápidamente los ojos hacia un lado. Con un fondo oscuro, las imágenes aparecen dentro del campo visual en forma de manchas luminosas o anillos alrededor del punto ciego. Los ojos no aprecian fosfenos iguales; el ojo que gira hacia la nariz "ve" un fosfeno más apagado que el ojo que gira hacia la sien. Si el fondo es brillante, las manchas se muestran oscuras.

Este tipo de fosfenos se han atribuido a la tracción y compresión del nervio óptico. Cuando giramos los ojos rápidamente, el haz nervioso de uno de los ojos se comprime y, se alarga, el del otro ojo; los fosfenos consiguientes son momentáneos. Hay quien los ve como anillos, enteros o fraccionarios, centrados en la zona del punto ciego. Purkinje describió franjas luminosas aproximadamente en el centro del campo visual. Si dirigía la mirada hacia la nariz, la imagen le resultaba permanente. Para Helmholtz, la imagen duraba muy poco, aunque girase vigorosamente el ojo.

Cuando cambia la acomodación, o distancia focal, del ojo también pueden aparecer fosfenos, pero éstos no son tan claros como los anteriormente descritos. Helmholtz sugería enfocar un objeto situado inmediatamente junto al exterior de una ventana y cambiar a un objeto alejado, minutos más tarde. Entonces, a la vez que la vista se acomoda a la visión a distancia, puede observarse un pequeño reborde luminoso en torno al campo visual. Lo que aquí ocurre es que la relajación repentina de los músculos del ojo produce unas variaciones de presión que generan fosfenos. Purkinje podía crear asimismo el reborde luminoso al aflojar repentinamente la presión sobre el ojo, observación que Helmholtz no consiguió repetir.

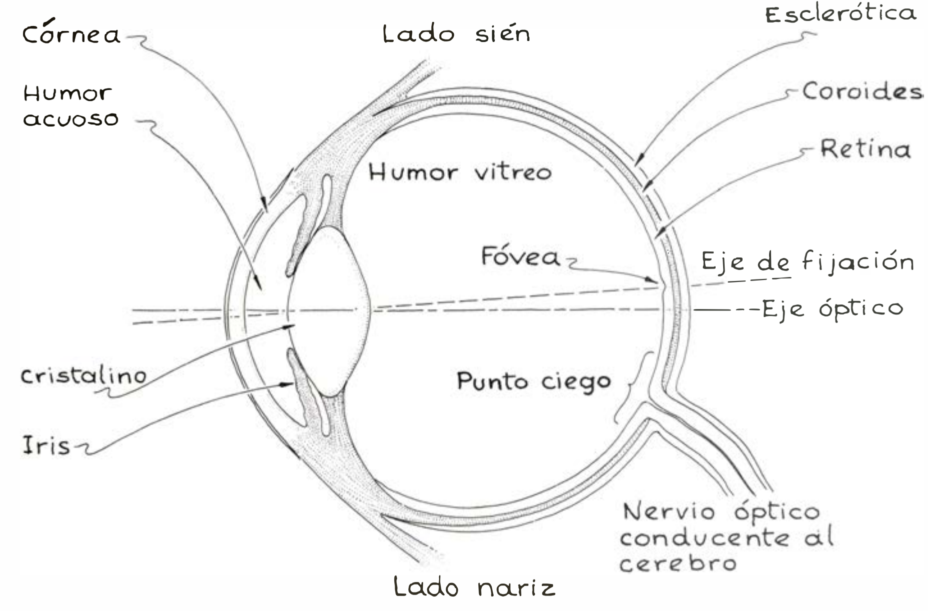
De todas las imágenes de fosfenos descritas por Helmholtz, las más extrañas son las que se le aparecen a una persona que se sienta durante un rato en oscuridad total. Estas figuras, que se han llamado el "cine del prisionero", no requieren compresión alguna sobre los ojos. Los fosfenos pueden aparecer siempre que en el campo visual no se produzcan variaciones. Esta situación puede darse en oscuridad total o bajo una luminosidad constante (como en una borrasca de nieve).

Para Helmholtz, las imágenes creadas por la oscuridad eran ondas que se interferían fundiéndose. Estas ondas se desplazaban lentamente con relación a las demás figuras. Probó que ese movimiento ondulatorio estaba sincronizado con su propia respiración. El fondo general sobre el que se movían las ondas nunca estaba en total oscuridad, sino que veía zonas iluminadas que aparecían y desaparecían con cada aliento.

Yo mismo observo este tipo de fosfenos cada vez que paso la noche en una caverna durante una excursión espeleológica. Tras apagar las luces y prepararme para dormir, la oscuridad es absoluta. Pero al cabo de 10 minutos, más o menos, observo manchones de luz borrosos y, sin luces de referencia que me sirvan de guía, los fosfenos me parecen luces reales situadas fuera de mi alcance.

Tyler ha publicado recientemente nuevas observaciones de estas figuras. Su trabajo se reseña en la bibliografía de este número. Cuando alguien hace converger la vista intensamente, como al contemplarse la punta de la nariz cruzando los ojos, pueden aparecer dos tipos de fosfenos. Si la convergencia se hace de forma rápida, pueden verse dos grandes anillos que rodean momentáneamente al punto ciego; son los que observó Purkinje durante una rotación rápida de los dos ojos y, dado que aparecen al girar ambos ojos hacia la nariz, su causa debe estar en el alargamiento del nervio óptico.

Hay otro tipo de fosfeno que se manifiesta si la convergencia se efectúa frente a una fuente luminosa uniforme y de modo intenso y constante. En el centro del campo visual, aparecen entonces unas pesas de gimnasia rojas, aunque algunos observadores informan



Corte transversal del ojo derecho, visto desde arriba

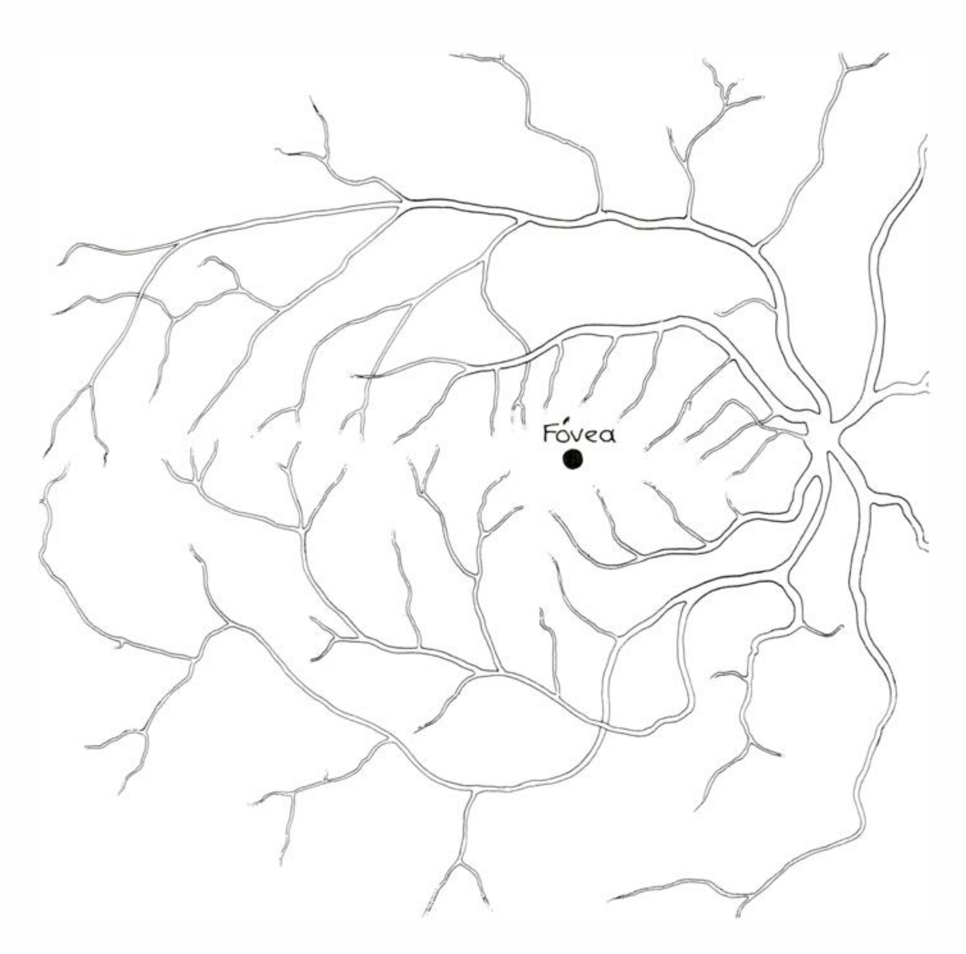
que ven discos rojos en vez de pesas. De este fosfeno es responsable la tensión producida al hacer converger la vista, pero es evidente que también se necesita luz adicional. Aquí ocurre que la luz podría llegar a la retina tanto atravesando la pupila como rodeando el globo ocular y a través de la esclerótica, que es la membrana blanca exterior que recubre el globo ocular.

Una sencilla comprobación revela cuál es la trayectoria de la luz. Si se colocan los dedos sobre cada párpado cerrado en la parte contigua a la nariz, el fosfeno desaparece, mientras que si se colocan en la parte próxima a la sien, el fosfeno se mantiene. Por consiguiente, la luz que participa en la imagen del fosfeno penetra en el campo visual a través de la pupila. El fosfeno aparece aun cuando se tape un ojo.

Apretando las palmas de las manos contra los ojos cerrados, durante un minuto aproximadamente, pueden crearse numerosos fosfenos de aspectos variados. Tyler ha clasificado estas figuras atendiendo al lugar del trayecto visual donde es más probable que se cree cada imagen. Con una compresión suave, la figura se compone de remolinos coloreados, causados verosímilmente por la disminución de oxígeno en la retina cuando la compresión retiene el flujo sanguíneo. Este efecto puede que se produzca en el fondo de los fotorreceptores (conos y bastoncitos) o en otro lugar más cercano a la superficie de la retina, como los ganglios. A veces, la fóvea aparece rodeada por un halo o anillo azul. Se desconocen las razones de la estructura y el color.

Con una compresión levemente mayor, y aflojando acto seguido, puede verse la configuración de la red circulatoria retiniana. Lo que ocurre entonces es que la variación de compresión sobre la retina produce una variación del flujo sanguíneo por la red circulatoria; en consecuencia, si la actividad nerviosa junto a los vasos es distinta de la actividad nerviosa a mayor distancia, puede exteriorizarse una visión esquemática del sistema vascular.

Aumentando aún más la compresión, y aflojando luego, podemos apreciar la red circulatoria de la coroides, que está situada entre la retina y la esclerótica. Este sistema, que aparece en rojo sobre fondo negro, quizá se manifieste con mayor claridad en el momento en que se afloja la compresión sobre la red y la sangre vuelve a fluir por ella. Uno de los pocos procedimientos para observar directamente el sistema circulatorio coroidal es precisamente éste.



Vasos sanguíneos retinianos del ojo derecho, que a veces se ven como fosfenos

Hay otros dos tipos de distribuciones de puntos que pueden observarse apretando a fondo. En ocasiones se ven a la vez. En un tipo de distribuciones aparecen puntos amarillos esparcidos al azar sobre fondo oscuro. En el otro, se presentan puntos luminosos de color violeta sobre un fondo más oscuro todavía. Los puntos amarillos son de tamaño normal, mientras que los violetas van creciendo a medida que se aproximan a la periferia del campo visual. Estas distribuciones pueden observarse con cualquiera de los dos ojos y no requieren apretarlos con violencia. Según razona Tyler, como la circulación sanguínea ya ha sido detenida por la compresión, estas distribuciones de puntos se producen probablemente en algún lugar del trayecto visual posterior a la posición de los fotorreceptores.

Cuando ambos ojos sufren una compresión a fondo como ésta, el observador puede ver figuras complicadas: un emparrillado regular parecido a un tablero de ajedrez o a una serie de triángulos dispuestos ordenadamente, o bien una estructura celular semejante a menor escala. A veces se observan ambas configuraciones superpuestas entre sí. Otras, aparecen incluidas unas cuantas zonas en blanco que Tyler compara con pantallas de televisión.

Para distinguir estas figuras complicadas se necesita una compresión a fondo y visión binocular; de ahí que, probablemente, el punto donde se producen se encuentre bastante adentrado en el trayecto visual. Tyler sugiere que se generan en la corteza óptica; se desconoce, empero, dónde y cómo se crean. Determinados elementos del sistema nervioso óptico parecen haber sido diseñados para reconocer líneas, pero hasta ahora no se sabe de elementos que identifiquen cuadrados, hexágonos o cualquiera de las figuras y dibujos geométricos que se ven en los fosfenos.

Si comprimiendo los ojos se manifiestan, al azar, elementos que reconocen líneas, cabría esperar que lo observable en los fosfenos fuesen líneas de distribución aleatoria y no dibujos geométricos. Entonces, puede que en algún lugar del proceso de visión, por debajo del nivel de consciencia, haya elementos que respondan a determinadas periodicidades y formas. En un grosero examen de los fosfenos geométricos podría conjeturarse que tales elementos se excitaran al ejercerse una compresión a fondo sobre ambos ojos.

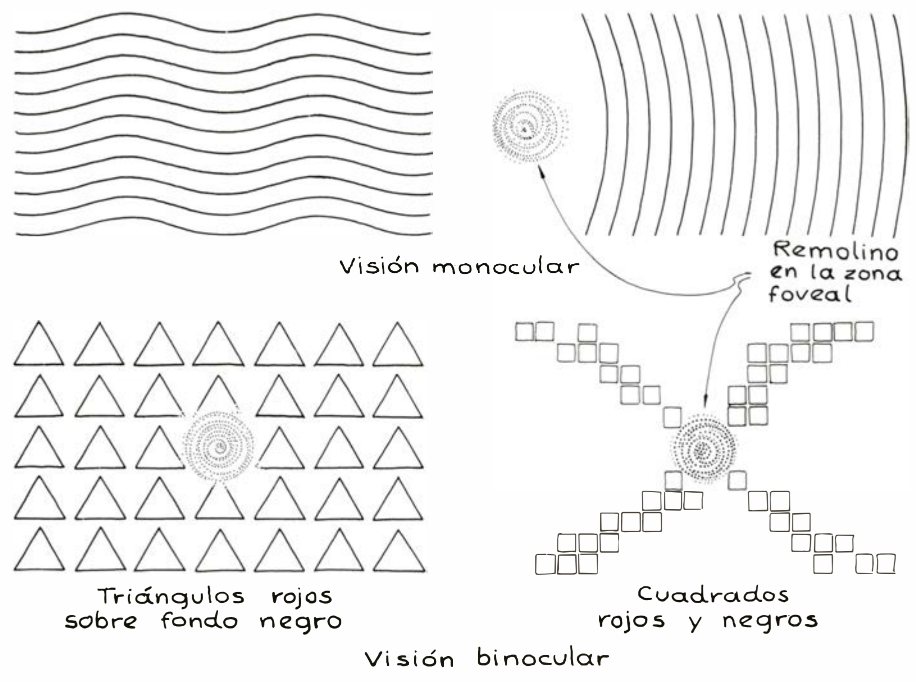
Parte de la fascinación que ejercen las luces estroboscópicas de las discotecas quizá resida en los fosfenos que engendran, incluso cuando tenemos los párpados cerrados. Una luz que destelle a razón de unas 10 a 30 veces por segundo puede inducir figuras geométricas muy vivas, llenas de colorido. (Tal vez el uso aquí del término "fosfeno" sea incorrecto. Aunque las imágenes que se ven bajo una luz parpadeante sean similares a las imágenes de fosfenos que se originan con una compresión a fondo sobre los ojos, no estoy seguro de que se obtengan los mismos efectos. Pese a ello, voy a suponer que sí lo son.)

En ensayos recientes relativos a luces parpadeantes se colocaron observadores mirando hacia una pantalla iluminada por detrás. La luz que incidía sobre ésta se había hecho intermitente interceptándola con un rodete giratorio, consiguiendo así una superficie con iluminación parpadeante y uniforme. A la frecuencia de 30 hertz pudieron percibirse al menos dos tipos de estructuras. Una de ellas consistía en cuadrados dispuestos a modo de un tablero de ajedrez; la otra, de hexágonos. Ambas duraban unos cinco segundos antes de fundirse en otra figura o en una visión sin interpretación posible. En la imagen de hexágonos los observadores pudieron distinguir una distribución a pequeña escala rodeada por una distribución de hexágonos mayores.

Son éstas sólo algunas de las figuras que pueden verse bajo una luz parpadeante. A frecuencias inferiores, de unos dos hertz, lo más que puede producir el parpadeo son zonas de grises y blancos revueltos. A frecuencias mayores (de 60 hertz o más) el parpadeo se hace menos manifiesto a medida que los pulsos luminosos se funden para dar paso a la sensación de que la pantalla está iluminada constantemente.

Para la mayoría de los observadores, las figuras geométricas coloreadas se manifiestan cuando la frecuencia se halla comprendida entre 10 y 30 hertz. Se cree que las figuras aparecen únicamente si ambos ojos reciben luz parpadeante. Esta necesidad de visión binocular implica que las figuras se formen en un lugar del trayecto visual más adentrado que los ojos; de lo contrario, bastaría con un solo ojo. Quizá se generen en la corteza óptica, que es donde se perciben las formas complicadas. Cabe presumir que la frecuencia del parpadeo sea igual a alguna frecuencia o periodicidad del proceso visual y que el cerebro resulte engañado.

En mi primer intento por ver este tipo de fosfenos recurrí al simple expediente de mantener las manos delante de la cara con las palmas hacia mí y los meñiques tocándose. Tras las manos puse una lámpara de incandescencia. Con los ojos cerrados, empecé entonces a separar y a unir las manos sin parar, al objeto de crear un efecto de parpadeo. Hallé, además, que enarcando las cejas podía conseguir más iluminación. Procuré no mirar directamente hacia la lámpara con los ojos abiertos,



Imágenes que se observan bajo luz parpadeante

pues el resultado hubiera sido una persistencia muy intensa de su imagen al cerrar los ojos para el experimento.

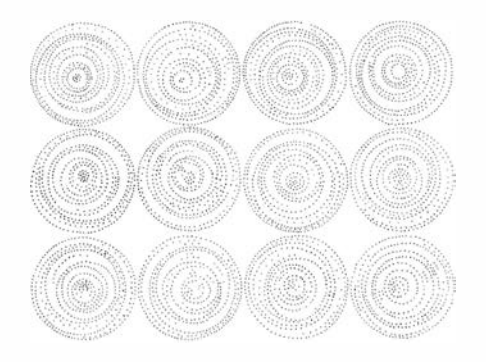
Cuando intercepté la luz de la lámpara a una frecuencia de unos ocho hertz, el campo visual se me separó en cuadrados rojos y negros impresionantemente nítidos. Aquello era todo un tablero de ajedrez. Los cuadrados se alineaban en diagonales que cruzaban por el centro de mi campo visual. Para crear esta figura necesité luz bastante intensa; la lámpara era de 100 watt y yo estaba a unos 10 centímetros de distancia.

Cuando me alejé de la lámpara, no pude ya ver los cuadrados. Pero sí fosfenos globulares de color azul en la mitad superior de mi campo visual. Este cambio se debe quizás a la disminución de la intensidad luminosa, la cual ha de superar cierto umbral para que se produzcan dibujos geométricos.

Experimenté a continuación con un estroboscopio, cuya intensidad era relativamente elevada y cuya frecuencia de destello podía hacerse variar a partir de un hertz. Puse cuidado en no mirar esa luz de destello con los ojos abiertos, no sólo para evitar imágenes secundarias, sino también para no lastimarme la vista. (Las lámparas de destello intensas afectan a algunas personas. Quienes estén en este caso deberán abstenerse de ensayos de esta clase.)

En los primeros tanteos cubrí el ojo izquierdo y me coloqué frente al estroboscopio con el ojo derecho cerrado. En cuanto aumenté la frecuencia de destello a partir de un valor inicial de 1 hertz, comencé a ver un torbellino que parecía encontrarse en la zona foveal de mi vista. A la frecuencia de unos pocos hertz, desde el torbellino se extendían radialmente unas líneas imprecisas; el campo no presentaba por lo demás rasgo alguno.

A unos seis hertz percibí lo que podría llamar una persiana veneciana. El torbellino foveal seguía allí, pero entonces era más luminoso. Con otro leve aumento de la frecuencia aparecieron ondulaciones tenues, centrada cada una en la zona foveal; el fondo se llenó de manchas. A una frecuencia de 11 hertz, el campo se moteó caóticamente con manchas luminosas; en la zona foveal aparecieron colores apagados, que empezaron a exhibir vigorosas palpitaciones. A los 12 hertz, todo el campo palpitaba con colores amarillos y otros más apagados; el campo situado a la izquierda de la zona foveal formaba una punta de flecha que señalaba hacia la fóvea.



Imágenes del espaldar de carey

Me tapé luego el ojo derecho; así pues, ninguno de los dos recibía luz. El campo visual se disgregó en un mosaico de celdillas que me recordó el espaldar de un carey. Cuando esta imagen secundaria se desvaneció, volví a descubrirme el ojo derecho y el campo tornó a manifestar colores vivos y palpitaciones rápidas; tenues ondas capilares se formaban y desaparecían.

Sin modificar la frecuencia, me cubrí el ojo derecho y me destapé el izquierdo, que mantuve cerrado. El campo se llenó de pétalos rojos y amarillos brillantes. Expuse luego, de repente, ambos ojos, cerrados, a la luz. El centro volvió a iluminarse y los pétalos persistieron en su brillo, pero en seguida la figura se transformó en tableros de damas a base de rojo, amarillo y azul. La visión era turbadora, deslumbrante, hasta el punto de que hube de sujetarme a la silla para mantener el equilibrio. Aquellas figuras se formaban, se disolvían, se dilataban y se contraían, todo ello en un cromatismo vivo.

Cuando incliné la cabeza hacia adelante, las estructuras parecieron ensancharse. Con la cabeza inclinada hacia arriba, de un lado a otro de la parte inferior de mi campo visual apareció un horizonte blanco, verosímilmente debido a una infiltración de luz a través de los párpados cerrados. Encima de esta banda blanca se encontraban las figuras coloreadas.

A frecuencias mayores, el campo fue perdiendo interés. A los 40 hertz sólo se veía un fondo luminoso sin rasgos. En cierto momento, aparté la vista del estroboscopio, esperé algunos minutos y entonces abrí los ojos de modo que veía mi escritorio. Hojas de papel y vasos de styrofoam eran iluminados por la luz destellante; sobre esos objetos danzaban figuras de remolinos similares a las que había visto mientras miraba el estroboscopio. Al mirar hacia la luz destellante, los polígonos se distinguían mejor, con ambos párpados cerrados.

Libros

Sobre el cerebro, la forma y la polémica entre Leibniz y Clarke

S. Palafox, R. Margalef y M. Artigas

El Cerebro. Varios autores. Libros de Investigación y Ciencia. Editorial Labor, S. A. Barcelona, 1980. Al reseñar la *Psicología Fisiológica,* que recoge también en un volumen una serie de magistrales artículos aparecidos inicialmente en las páginas de *Scientific American* (véase *Investigación y Ciencia,* julio, 1980), concluía mi ensalzadora crítica con "el intento de hacer valer un hecho evidente: *Investigación y Ciencia* ha publicado ya trabajos más recientes en número suficiente para hacer sin mayor esfuerzo otro volumen de selecciones sobre *Psicología Fisiológica*". Y hasta proponía que "con el número 38 de noviembre de 1979 y lo publicado desde 1976 podría escogerse con facilidad material de primera para ese segundo volumen". Tras apuntar lo cual finalizaba así: "Quede, pues, como cierre de esta recensión, el claro apoyo a la buenísima calidad de lo que se ha hecho y el explícito deseo de inquietar a quien corresponda para que un acierto tal no se interrumpa".

No voy a caer en la vanidad de creer que fue por ese mi explícito deseo de inquietar a quien correspondía, sino sin duda porque tal deseo encerraba un acierto que el cuerpo editorial compartía, el hecho es que este libro que ahora reseño proviene de añadir cuatro nuevos trabajos de gran calidad a los que sobre "el cerebro" aparecieron en dicho extraordinario de noviembre del 79. Y si algo hubiera que lamentar, sería tan sólo que no se le hayan incorporado más –por ejemplo alguno actual sobre el cerebelo–, para que el elenco abarcase aspectos de todo el encéfalo. Los dieciséis que lo forman, no tienen, empero, desperdicio; cada cual por razones específicas, y todos por virtudes comunes, a lo que ha de añadirse su acertada ordenación de conjunto, pese a que esto siempre admitiría retoques, según gustos del lector.

En efecto, la introducción de D. H. Hubel sobre cómo han ido progresando nuestros conocimientos acerca de la estructura del cerebro y su funcionamiento, aludiendo oportunamente a capítulos del libro donde alguno de estos hitos se muestra o refleja con toda claridad, está muy bien hilvanada al respecto, aunque diste mucho de dar entre líneas la talla filosófica exigible, ya que el autor confiesa armarse un lío cuando del cerebro pasa a la mente y de ésta a la comprensión..., declarando inescrutable ¡y "sobrenatural"! todo lo que no se entienda en términos fisicoquímicos. La traducción no tiene más remedio que cargar con este incomprensible tropezón de entrada, que más que realidad parece chiste tópico sobre el daltonismo positivista de la investigación yanqui actual.

La estructura neuronal como elemento básico, y los principios de producción del estímulo y la transmisión del impulso, son el concreto tema del segundo capítulo, la neurona, en que Ch. F. Stevens luce su mejor metodología expositiva. A continuación, E. R. Kandel muestra en microsistemas de neuronas, aprovechando la simplicidad en el género *Aplysia,* cómo tan sencillas y bien estudiadas estructuras permiten comprender un grado elemental de aprendizaje y memoria. Admirable es la amenidad que W. J. H. Nauta y M. Feirtag saben dar a una exposición didáctica del otro extremo en este nivel de lo estructural: la complejísima organización del cerebro, o, por mejor decir, de todo el sector clásicamente llamado "central" de nuestro sistema nervioso, del que a continuación expone W. M. Cowan el desarrollo del cerebro con gran alarde didáctico para abordar los problemas neurobiológicos que plantean el desbordante número de neuronas surgentes al crecer y su pasmosa seguridad para encontrar su lugar correspondiente y establecer sus conexiones adecuadas.

Cambia la perspectiva, y no poco el lenguaje, en el capítulo 6.º, de L. L. Iversen, titulado química del cerebro, que versa sobre neurotransmisores, su estructura y su dinámica bioquímico-neural, y que se complementa linealmente con el subsiguiente, "segundos mensajeros" en el cerebro, en el que J. A. Nathason y P. Greengard explican cómo a través de tales sustancias y las diversas rutas secuenciales que inician, los neurotransmisores pueden suscitar variados efectos neurofisiológicos, gracias a esos "segundos mensajeros", cuya acción explican. Virando hacia la farmacoquímica, entraría también en la perspectiva molecular el capítulo 11, de S. H. Snyder, sobre los receptores de los opiáceos y sustancias opiáceas endógenas, título que no requiere explayación alguna, aunque sería injusto pasarlo sin alabar la claridad con que se introduce al lector en el tema. Quizá por su carácter patológico, le sigue, con el número 12, el estudio enfermedades cerebrales, por fuerza menos homogéneo, pero igualmente loable como un esfuerzo bien logrado de S. S. Kety para iniciar en el tema.

Más dotado sin duda para la indagación neurológica que para la reflexión filosófica, D. H. Hubel da la talla de investigador a que debe su fama en el capítulo 8, sobre mecanismos cerebrales de la visión, que firma con T. N. Wiesel. Hubel no solamente ha logrado ser un clásico obligado en el tema, sino que no es esta su primera contribución al mismo aparecida en la revista de origen. Otro tanto hay que decir de la revisión actualizada sobre el comportamiento onírico (capítulo 15), que el igualmente clásico en este biorritmo, M. Jouvet, publicó en la edición francesa de *Scientific American,* y se incluye en el libro reseñado. Y análogo cabría considerar, aunque en muy diversa cuestión, los mecanismos cerebrales del movimiento, en que, como capítulo 9, pone al día el muy experto en la misma E. V. Evarts, con lo que los circuitos de referencia cíclica o espiral han aportado al mejor entendimiento de lo que no es posible explicarse como mera referencia. En esta línea de problemas habría que situar, capítulo 13, un estudio hipotético-estadístico que E. G. Austt y W. Buño Jr. titulan ritmos eléctricos del cerebro e integración sensoriomotriz, aunque debe hacerse constar se trata de una investigación de muy diverso fuste y pretensión, dicho sea sin el menor asomo de juicio de valor.

Interesante donde los haya, y claro hasta lo insuperable, es la síntesis sobre las zonas de actividad diversa y las funciones superiores, que como especializaciones del cerebro humano expone N. Geschwind en el capítulo 10, y tan aparatoso en su ilustración como inte-

resante para la investigación resultó el estudio del capítulo 14 sobre concomitancias entre FUNCIÓN CEREBRAL Y FLUJO SANGUÍNEO, de N. A. Lassen, D. H. Ingrar y E. Skinhøj, que, aparecido ya en *Investigación y Ciencia* (diciembre del 78), aportó espléndidos gráficos que han sido reproducidos en no pocas revistas, y se ha tenido el acierto de incorporarlo a esta obra extraordinaria, que cierran unas REFLEXIONES EN TORNO AL CEREBRO, con las que F. H. C. Crick pretende y logra hacer reflexionar sobre el nuevo centro de su interés: la neurobiología humana, a la que se ha consagrado tras alcanzar en la investigación genética el premio Nobel y la merecidísima fama que nadie ignora.

No he querido dejar para párrafo aparte el juicio favorabilísimo, que –salvo lagunillas también señaladas al paso– merece este alarde editorial, donde las espléndidas y muy didácticas ilustraciones rivalizan en calidad con el esfuerzo expositivo, ejemplarmente logrado por tan diversos autores. Ante eso, que es el noventa y nueve por ciento de cuanto sobre la obra cabe decir, poco más que casi nada puede significar algún reparillo menor, inevitablemente factible siempre "a posteriori". Pocos de ellos son achacables a los editores (¿por qué, empero, nada sobre cerebelo, en vez, por ejemplo, de ese capítulo 13 de tan diverso carácter?), o a los autores. (¿Por qué Hubel empaña la introducción –en el resto muy buena– desbarrando sobre lo que no alcanza? ¿Por qué Nauta y Feirtag ni siquiera aluden a la sensibilidad géusica, o no han corregido evidentes erratas como la de atribuir –penúltima figura– al cerebro anterior un núcleo situado en el cerebro medio? ¿Por qué Snyder da unos nombres comerciales –que no son únicos ni es ético propagar– para el clorodiacepóxido y el diacepán?..., valgan estos ejemplos concretos.) La mayor parte de las "moscas" que afean un poco el texto se deben, como siempre, a los traductores. El que éstos sean varios hace que, a más de no quedar la versión homogénea en su nivel –por lo demás muy bueno en conjunto–, fallos que unos cometen no son tropiezo para otros. Para que no parezca que se dice esto porque siempre es más o menos real, y se vea que pese a ser concretamente cierto no empaña el logro de la publicación reseñada, permítaseme transcribir algunos ejemplos, a título de modos genéricos que se especifican en más casos de los que cito.

"Alimentar" en el sentido de actuar o estimular es corriente y moliente anglicismo, como "retroalimentación". Dejar sin traducir "milivolt" en el texto, siendo así que se pone "milivoltios" en las figuras, es descuido censurable. Llamar "núcleos" en unas páginas, y "cuerpos geniculados" en otras, cuando lo académico es "corpus" en la nómina, resulta inadecuado. Como lo es no traducir "colliculus", "funiculus" y "sulcus", sin tan siquiera ponerlos en cursiva al quedar en latín. Peor es tal vez, aunque tampoco grave, traducir mal y escribir "asumió" por supuso, "canales neurales" al margen de lo embriológico, "ganglios" por núcleos basales, o "una estrecha proximidad" (pág. 85), cuando es evidente que lo estrecho es el hiato, no la cercanía, claro está. Más discutible, puesto que se ha convertido en impropiedad común, es traducir *cleft* por "hendidura" al describir las sinapsis o referirse a ellas. Entre dos unidades distintas –"articuladas" como repitió incansablemente Cajal– no hay hendidura ni surco, sino intersticio, espacio u holgura; estrecho, vano o resquicio –etc., etc.–, entre la membrana pre y la post o subsináptica.

Valga tan sólo este muestreo de pequeñísimas ligerezas, para evitar a los artífices del libro que de la merecida satisfacción por lo que han hecho pudieran pasar a la peligrosa soberbia de creerse perfectos, donde como ya advirtió Ortega la perfección no es posible: al traducir, y donde los duendes existen como las meigas: al imprimir. Y confírmese también el lector en que cuando todo lo que cabe censurar de una obra son algunas partículas léxicamente subatómicas, que nada estorban a su perfecta intelección, es porque se halla ante un libro excepcional, sobre el que quisiera terminar como comencé: rogando a los editores que no sea el último volumen que seleccione, recoja y reordene temas ejemplares de *Investigación y Ciencia* sobre psico-neuro-biología. (S. P. M.)

SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA FORMA, por D'Arcy Wentworth Thompson. H. Blume. Ediciones; Madrid, 1980; 330 páginas con 181 figuras. D'Arcy Thompson publicó este libro, por primera vez, en 1917. En 1942 apareció una segunda edición ampliada, aunque sin adiciones sustancialmente importantes, de la que John Tyler Bonner, biólogo bien conocido e interesado igualmente en los problemas de regulación de la forma, preparó una edición condensada y con notas en 1961. Esta es la edición que ha sido vertida al castellano. Thompson era hombre de gran corpulencia física y enorme personalidad y de él cuentan chispeantes anécdotas, que no hacen al caso, gentes que le conocieron en las reuniones internacionales relacionadas con la exploración y explotación de los mares. Era, sin duda, además de científico, humanista y artista; veía la ciencia más como camino que como meta y, por supuesto, como obra de arte. De aquí el valor perdurable de este libro, superior al de la exposición del estado del conocimiento científico de un área de la biología en un momento dado. Debate temas que aparecen una y otra vez con vestimenta cambiada. A mi manera de ver, su meollo consiste en explorar y aceptar la aplicabilidad en biología de un idealismo matemático; ver, en las relaciones expresables numéricamente, algo más que el resultado estadístico de un gran número de procesos ocurridos en el pasado. Ver algo más significa, en este caso, aceptar un futuro ya más o menos hecho y determinado. Yo no comparto este punto de vista, pero reconozco que hoy tiene adeptos, desde el uso generalizado de parámetros demográficos y de coeficientes de interacción entre especies hasta el interés desmesurado –y probablemente pasajero– por las aplicaciones de la teoría llamada de las "catástrofes" a la biología. Es claro que las opiniones de Thompson le hacen sentirse incómodo dentro del marco de la biología de la época, especialmente de la biología evolucionista y genética, como él mismo explicita. Está dentro del mismo espíritu que el libro acabe con una referencia de Jean Henri Fabre, "cuya escritura provenzal parece pensada para música dórica".

En un capítulo sobre la magnitud (32 páginas) comenta, partiendo de Galileo, los principios de construcción que imponen ciertas limitaciones a tamaños y proporciones, tanto a las patas de un elefante como al tronco de un árbol, y aun a la velocidad de natación de los peces. El salto, el vuelo, la natación, se han de basar en relaciones entre energía y tamaño de los respectivos animales y propiedades físicas de los fluidos en el seno de los que se mueven. Otras consideraciones conducen a una interpretación aproximada de una formulación antigua de la regla de Bergmann.

En este mismo capítulo y en los dos siguientes aparece, en distintos contextos, la interpretación de la forma de las células y de los agregados de células. Después de los progresos en el estudio de la anatomía fina de células y tejidos, toda esta parte es completamente obsoleta; pero nos revive una época en que los intentos de fabricar remedos de células y tejidos de Léduc y los cristales líquidos de Lehmann tuvieron reflejo

en nuestro calmoso mundo científico, a través de la indignación y las diatribas del P. Jaime Pujiula.

El capítulo que trata de la forma (40 páginas) es posiblemente el menos satisfactorio, por las razones dichas. Hoy día ya no se puede pretender ver formas geométricamente simples, explicables por la operación de mecanismos físicos sencillos, en la rica variedad de conformaciones con que nos deleitan los organismos microscópicos de diferentes grupos.

El estudio de los agregados de elementos (42 páginas) parte de la comparación de los límites entre células con la disposición de las láminas líquidas en una masa de espuma, lo que le lleva de nuevo a las experiencias de Léduc; pero también a las células de Bénard. E introduce así una aproximación más dinámica, aunque el desconocimiento de microtúbulos y demás elementos de construcción de las células reales hace que todo ello quede en puro ejercicio intelectual, sin duda interesante y de vigencia en otras áreas. En la página 89, la mención de burbujas de 2,5 a 30 centímetros de diámetro debe ser una errata. Como puede suponerse, la discusión de las celdillas de las abejas, tema clásico en este contexto, ocupa una buena parte del capítulo y se lee con gusto. La idea de la inversión óptima de un recurso está muy viva en ecología actual, pero probablemente tiene un valor de predicción tan limitado en la realidad como el criterio de la máxima economía en el uso de la cera en una colmena.

En el capítulo dedicado a las espículas (38 páginas) las formaciones esqueléticas de esponjas, radiolarios y otros organismos se interpretan principalmente como si reflejaran la forma de las aristas comunes de los poliedros en contacto que forman una masa espumosa. Esto le lleva a creer en la intrascendencia de la forma precisa en cada caso, y se chancea de las 4314 especies de radiolarios de Haeckel. No es apropiado que esquematice a *Dictyocha* sólo en la periferia de un radiolario que las lleva de prestado y que poco ha podido influir en su generación.

Las espirales (30 páginas) le fascinan y consigue fascinar al lector con ellas. Flores, foraminíferos, caracoles y *Nautilus* presentan ejemplos cuyo análisis estimula el pensamiento. El mantenimiento de la forma a lo largo del crecimiento es uno de los aspectos más interesantes de la espiral, que, más o menos directamente, conduce a la discusión del significado de la forma en la filogenia.

El capítulo que trata de cuernos, dientes y colmillos (18 páginas) viene a ser una continuación del anterior, con un material más especializado. Trata también de la forma en el pico de ciertas aves y concluye con unas consideraciones sobre el colmillo del narval, fuera ya de lugar, aunque de interés histórico y sabrosas de leer.

La eficiencia mecánica de la arquitectura de los animales (44 páginas) se estudia fundamentalmente en el esqueleto de los vertebrados. De una parte se fija en la disposición de las trabéculas en los huesos, que dan a éstos su adecuación mecánica a las funciones que han de realizar, y, de otra, analiza la disposición de los esqueletos enteros, con ilustrativas comparaciones con problemas de ingeniería, principalmente con la construcción de puentes, en cuyo parangón los huesos representan elementos sujetos a un esfuerzo de compresión y los ligamentos y tendones, elementos sometidos a un esfuerzo de tracción. De aquí pasa a una discusión global de problemas de filogenia, que considera más allá de la selección relacionada con la variabilidad de cada uno de los constituyentes del cuerpo. Este es un tema central de todo el libro y posiblemente el que está más en conflicto con la visión "ortodoxa": Thompson ve el cambio de forma como un proceso único y casi elemental, idealizable en una expresión matemática.

El estudio de las transformaciones sobre sistemas de coordenadas (54 páginas) constituye, probablemente, la mayor influencia que ha tenido este libro, a juzgar por la frecuencia con que se copian sus esquemas, en muy diversas obras de biología, aparecidas durante medio siglo. Puesto que Thompson ve la forma de un organismo como una unidad armónica, en la que sería desorientador analizar separadamente el crecimiento y la evolución de cada una de las piezas, se comprende que las expresiones alométricas, basadas en la comparación de magnitudes arbitrariamente definidas sobre elementos aislados de la construcción del cuerpo, no hubieran podido satisfacerlo. Se anticipó a ellas y, en cierta forma, las completó, considerando la variación sobre un retículo de puntos, que las necesidades de la representación plástica reducen a dos dimensiones en los diagramas más conocidos, pero que él piensa en las tres dimensiones. Hay que reconocer que este procedimiento es ideal para relacionar formas próximas, y que resulta especialmente demostrativo para aquellos grupos de animales que tienen una gran plasticidad, como los anfípodos o los peces. La comparación de formas, más alejadas unas de otras, es imposible o sería totalmente arbitraria. Por supuesto, la transformación de coordenadas es suficientemente arbitraria en sí y no pretende darles una expresión matemática sencilla, sino es destacar su carácter de continuidad, compatible con la deformación. Evidentemente, la idea que está detrás, aunque no la expresa abiertamente, es la comparación con un campo físico. La ontogenia y la filogenia aparecerían como una generación progresiva de formas por un campo de fuerzas.

El índice alfabético es suficientemente extenso y adecuado. La traducción de J. M. Ibeas nos da de manera fluida el espíritu del libro. Se lee losange por rombo (p. 108), lo que puede ser una reminiscencia heráldica, y a Dom Guido Grandi se le trata de "Abbot" (p. 273). El libro contiene muchas citas en francés y en alemán, en latín y en griego, sin traducir. En general, sabemos poco latín y menos griego y se agradecería la traducción. Ahora quedamos como ante una película doblada, donde dejan que el maitre hable francés y, los malos, alemán o ruso; con la diferencia de que aquí los autores citados tienen cosas más importantes a comunicar que aquellos comparsas. (R. M.)

La polémica Leibniz-Clarke. Edición de Eloy Rada. Taurus; Madrid, 1980 (174 páginas). En este libro, después de una introducción histórica de Eloy Rada, se recogen las 5 cartas de Leibniz y las correspondientes 5 respuestas del newtoniano Clarke, escritas en 1715 y 1716, en las que –mediante críticas y réplicas mutuas– ambos autores polemizan sobre las implicaciones filosóficas de la física de Newton.

La famosa polémica Leibniz-Clarke se inscribe en el ámbito de las discusiones que acompañaron al nacimiento sistemático de la física moderna. Sus temas centrales son dos. En primer lugar, la naturaleza del espacio y del tiempo, que los newtonianos consideraban como "absolutos", o sea, con una existencia independiente de los cuerpos; Leibniz niega esta concepción, que prevaleció en la física hasta que Einstein formuló su teoría de la relatividad. En segundo lugar, la perfección del mundo natural: los newtonianos subrayaban la contingencia de las leyes de la naturaleza material, viendo en ella un indicador de la necesidad de especiales intervenciones divinas, mientras que para Leibniz la concepción newtoniana no era conforme con la perfección de Dios.

Alrededor de estos temas, Leibniz y Clarke polemizan sobre muchas cuestiones relacionadas con la teología natural, aunque los dos sostienen la existencia de Dios, su perfección infinita y su providencia sobre los seres creados.

El significado de esta polémica se relaciona con la insuficiente comprensión que en aquella época se tenía acerca de la naturaleza de la nueva física. El mismo Newton dio ocasión a equívocos. Afirmó, por ejemplo, que en la física (o "filosofía experimental", como él la llamaba), "se sacan las proposiciones de los fenómenos, y se las hace enseguida generales por inducción" (Escolio general de sus *Principios matemáticos de la filosofía natural,* cuya primera edición es de 1687), de tal modo que "el grande y principal asunto que se debe proponer en la física es razonar sobre los fenómenos sin la ayuda de hipótesis imaginarias; deducir las causas de los efectos, hasta que se llegue a la causa primera, que ciertamente no es mecánica" (*Optica,* libro III, cuestión XXVIII: la primera edición de esta obra es de 1704, y las últimas cuestiones fueron añadidas en la edición latina de 1706, realizada por Clarke). Aunque estas y otras afirmaciones de Newton pueden entenderse correctamente, se prestaban a una interpretación "inductivista" del método científico, que de hecho ha tenido amplia difusión, y que no corresponde a la verdad.

Las ideas filosóficas que se presentaban unidas a la física de Newton desempeñaron un papel decisivo en la aceptación y difusión de la nueva ciencia. Es éste un hecho que debería ser tenido en cuenta por quienes piensan que el éxito de las teorías científicas se debe exclusivamente al carácter concluyente de sus demostraciones. El newtoniano Roger Cotes, en su prefacio a la segunda edición de los *Principios* de Newton (1713), afirma que, frente a la filosofía aristotélica y a la cartesiana, se encuentra la newtoniana, o sea, la de "aquellos que en su filosofía no reconocen ninguna otra regla que la experiencia", de modo que "no hacen hipótesis, y no admiten ninguna en física, si no es para someterla a examen y reconocer su verdad o su falsedad mediante una discusión exacta y rigurosa". Pero esta imagen ideal de la física no iba de acuerdo con la realidad. Por ejemplo, algunas ideas centrales de la física newtoniana (los conceptos de espacio y tiempo absolutos) no sólo carecían de bases sólidas, sino que en parte fueron un obstáculo para el posterior desarrollo de la física moderna.

No es que Leibniz tuviera una comprensión mucho mejor del método de la física. Tanto Leibniz como Clarke se equivocan frecuentemente cuando formulan las implicaciones filosóficas de la física experimental, por ejemplo en sus discusiones acerca de los átomos y el vacío, del materialismo o del mecanicismo. Su controversia tiene, por estos motivos, un tinte anacrónico que limita su interés casi exclusivamente al ámbito de los historiadores.

Pero esa polémica cobra mayor interés cuando se advierte que los problemas epistemológicos implicados en ella continúan siendo objeto de discusiones en la actualidad.

La epistemología contemporánea ha clarificado muchas de las cuestiones relativas al método científico, pero sus aciertos están acompañados muchas veces por enfoques desafortunados que impiden obtener una imagen satisfactoria de la ciencia. Por ejemplo, se señala –frente al inductivismo– la importancia del método hipotético-deductivo en las ciencias, pero a la vez se niega no pocas veces todo valor a la inducción, llegando a la falsa conclusión de que todo conocimiento científico es conjetural. Se subraya acertadamente el frecuente uso que las ciencias hacen de convenciones pragmáticas, pero no siempre se consigue evitar un convencionalismo que reduce erróneamente el alcance de la ciencia a su utilidad como base teórica de la técnica. Se afirma el valor realista del conocimiento científico, pero con frecuencia se admiten enfoques de tipo empirista que –si se desarrollan de modo coherente– conducen al relativismo y al escepticismo. Se suceden las discusiones acerca de la racionalidad científica, pero la falta de bases metafísicas adecuadas llevan a dificultades y contradicciones que impiden conseguir una comprensión correcta de la racionalidad humana y de sus importantes implicaciones teóricas, éticas y políticas.

La raíz de esas y otras dificultades de la epistemología contemporánea es doble. Por una parte, tiene un aspecto teórico: la gran complejidad de las ciencias, tal como se desarrollan en la realidad, hace difícil obtener una imagen simple del método científico sin incurrir en extrapolaciones. Por otra parte, el desarrollo de la epistemología ha ido frecuentemente acompañado por un contexto polémico nada propicio para la clarificación objetiva de los problemas: la polémica Leibniz-Clarke es un ejemplo –entre muchos otros– de las controversias que se basan en una epistemología deficiente y tienden a perpetuarla.

Por ejemplo, Clarke afirma que la física newtoniana se opone directamente a la filosofía materialista (1.ª carta, n.º 1), mientras que Leibniz lo niega (2.ª carta, n.º 1). Leibniz argumenta contra la existencia del vacío y de los átomos en base a la perfección divina y al principio de razón suficiente (postdata de la 4.ª carta). Clarke afirma que la realidad del espacio no es una hipótesis, sino una verdad demostrada (4.ª carta, n.º 14). Este tipo de equívocos es frecuente en la polémica entre Leibniz y Clarke, y muestra que ambos autores carecen de una adecuada perspectiva epistemológica.

Si pueden extraerse lecciones de la historia, una de ellas podría ser la de evitar en el presente equívocos semejantes a los anteriormente señalados. El anacronismo de las antiguas confusiones epistemológicas no significa que otras semejantes no puedan darse ahora. Parecen darse, de hecho, cuando se afirma que el naturalismo ontológico es un presupuesto o una consecuencia del método científico, cuando se sostiene que la psicología ha de ser conductista, cuando se niega que pueda alcanzarse certeza en el conocimiento y se pretende fundamentar esa negación en base a la naturaleza del conocimiento científico, o cuando se estipula que toda filosofía válida ha de seguir métodos análogos a los de la ciencia experimental.

Los méritos indiscutibles de la física newtoniana provocaron la creación de un auténtico mito. La obra de Newton serviría, según Clarke, para establecer de modo profundo y firme la religión natural. Posteriormente se vio en ella el modelo que debería seguir la filosofía para consolidarse como ciencia rigurosa, e incluso el patrón para la organización de la sociedad.

Hoy día nadie sostendría semejantes pretensiones. Sin embargo, el mito se ha agrandado: ya no es la ciencia newtoniana, sino el método científico en general lo que se presenta como instrumento único o principal para conseguir la sabiduría y la paz social. Y algunas ideologías influyentes (como el "socialismo científico", el psicoanálisis o las teorías de la evolución total) se atribuen las garantías del mítico método científico. Por todo ello, autores de diversas tendencias han hecho sonar la señal de alarma frente a un cientificismo que, con diversas variantes, supone una peligrosa contaminación del medio ambiente intelectual con serias consecuencias en la vida social. La epistemología muestra que la ciencia experimental no es autosuficiente. (M. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

AHORRO DE COMBUSTIBLE DE LOS VEHICULOS LIGEROS

PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL AUTOMOTIVE FUEL ECONOMY RESEARCH CONFERENCE, WASHINGTON, D. C., October 31-November 2, 1979. U.S. Department of Transportation, U.S. Government Printing Office, 1980.

CONSERVATION AND ALTERNATIVE FUELS IN THE TRANSPORTATION SECTOR. Transportation Task Force of the SERI Solar/Conservation Study. National Technical Information Service, U.S. Government Printing Office, 1981.

GENES FRAGMENTADOS

IMPLICATION OF RNA-RNA SPLICING IN EVOLUTION OF EUKARYOTIC CELLS. James E. Darnell, Jr., en *Science,* vol. 202, n.º 4374, págs. 1257-1260; 22 de diciembre de 1978.

INTRONS AND EXONS: PLAYGROUNDS OF EVOLUTION. Walter Gilbert en *Eucaryotic Gene Regulation,* dirigido por Richard Axel, Tom Maniatis y C. Fred Fox. Academic Press, 1979.

SPLIT GENES AND RNA SPLICING. Francis Crick en *Science,* vol. 204, n.º 4390, págs. 264-271; 20 de abril de 1979.

LAS FUENTES DE BROTES CELESTES DE RAYOS X

DUAL CHARACTER OF THE RAPID BURSTER AND A CLASSIFICATION OF X-RAY BURSTS. Jeffrey A. Hoffman, Herman L. Marshall y Walter H. G. Lewin en *Nature,* vol. 271, n.º 5646, págs. 630-633; 16 de febrero de 1978.

A SPECTROSCOPIC STUDY OF THE OPTICAL COUNTERPARTS OF THREE X-RAY BURSTERS. Claude R. Canizares, Jeffrey E. McClintock y Jonathan E. Grindlay en *The Astrophysical Journal,* vol. 234, n.º 2, 1.ª parte, págs. 556-565; 1 de diciembre de 1979.

GALACTIC BULGE SOURCES, WHAT ARE THEY? (X-RAY SOURCES IN GLOBULAR CLUSTERS AND BURST SOURCES). Walter H. G. Lewin y Gene W. Clark en *Annals of the New York Academy of Sciences,* vol. 336, págs. 451-478; 1980.

LA CRESTA DE LA DORSAL DEL PACIFICO ORIENTAL

SUBMARINE THERMAL SPRINGS ON THE GALAPAGOS RIFT. John B. Corliss, Jack Dymond, Louis I. Gordon, John M. Edmond, Richard P. von Herzen, Robert D. Ballard, Kenneth Green, David Williams, Arnold Bainbridge, Kathy Crane y Tjeerd van Andel en *Science,* vol. 203, n.º 4385, págs. 1073-1083; 16 de marzo de 1979.

EAST PACIFIC RISE: HOT SPRINGS AND GEOPHYSICAL EXPERIMENTS. The RISE Project Group: F. N. Spiess, Ken C. Macdonald, T. Atwater, R. Ballard, A. Carranza, D. Córdoba, C. Cox, V. M. Díaz García, J. Francheteau, J. Guerrero, J. Hawkins, R. Haymon, R. Hessler, T. Juteau, M. Kastner, R. Larson, B. Luyendyk, J. Macdougall, S. Miller, W. Normark, J. Orcut y C. Rangin en *Science,* vol. 207, n.º 4438, págs. 1421-1433; 28 de marzo de 1980.

SISTEMAS DE CONTRACORRIENTE EN LOS ANIMALES

COUNTER-CURRENT HEAT EXCHANGE IN THE RESPIRATORY PASSAGES: EFFECT ON WATER AND HEAT BALANCE. Knut Schmidt-Nielsen, F. Reed Hainsworth y David E. Murrish en *Respiration Physiology,* vol. 9, n.º 2, págs. 263-276; mayo, 1970.

NASAL HEAT EXCHANGE IN THE GIRAFFE AND OTHER LARGE MAMMALS. V. A. Langman, G. M. O. Maloiy, K. Schmidt-Nielsen y R. C. Schroter en *Respiration Physiology,* vol. 37, n.º 3, págs. 325-333; agosto, 1979.

DESATURATION OF EXHALED AIR IN CAMELS. Knut Schmidt-Nielsen, R. C. Schroter y Amiram Shkolnik en *Proceedings of the Royal Society of London, Series B,* en prensa.

ATOMOS ALTAMENTE EXCITADOS

STARK STRUCTURE OF THE RYDBERG STATES OF ALKALI-METAL ATOMS. Myron L. Zimmerman, Michael G. Littman, Michael M. Kash y Daniel Kleppner en *The Physical Review,* vol. A20, n.º 6, págs. 2251-2275; diciembre, 1979.

ORIGIN AND STRUCTURE OF THE QUASI-LANDAU RESONANCES. Jarbas C. Castro, Myron L. Zimmerman, Randall G. Hulet, Daniel Kleppner y Richard R. Freeman en *Physical Review Letters,* vol. 45, n.º 22, págs. 1780-1783; 1 de diciembre de 1980.

EL GIRASOL

THE SUNFLOWER CROP IN MINNESOTA. R. G. Robinson. Minnesota Agricultural Experimental Station Extension Bulletin 299, Universidad de Minnesota, 1973.

SUNFLOWER SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por Jack F. Carter. American Society of Agronomy, 1978.

COSMOLOGIA Y OBSERVACIONES

THE REALM OF THE NEBULAE. E. Hubble. Yale University Press, 1936.

THE CREATION OF THE UNIVERSE. G. Gamow. Viking Press; Nueva York, 1952.

THE REDSHIFT. G. Sandage en *Stars and Stellar Systems,* vol. IX. Chicago University Press, 1975.

COSMOLOGIA. H. Bondi. Editorial Labor; Barcelona, 1977.

TEMAS METAMAGICOS

COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. Alan M. Turing en *Computers and Thought,* dirigido por E. A. Feigenbaum y J. Feldman. McGraw-Hill Book Company, 1963.

CAN PSYCHIATRISTS DISTINGUISH A COMPUTER PROGRAM SIMULATION OF PARANOIA FROM THE REAL THING? THE LIMITATIONS OF TURING-LIKE TESTS AS MEASURES OF THE ADEQUACY OF SIMULATIONS. Jon F. Heiser, Kenneth Mark Colby, William S. Faught y Roger C. Parkison en *Journal of Psychiatric Research,* vol. 15, n.º 3, págs. 149-162; 1979.

TALLER Y LABORATORIO

SUBJECTIVE PATTERNS IN A FLICKERING FIELD: BINOCULAR VS. MONOCULAR OBSERVATION. Arnulf Remole en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 63, n.º 6, págs. 745-748; junio, 1978.

SOME NEW ENTOPTIC PHENOMENA. Christopher W. Tyler en *Vision Research,* vol. 18, n.º 12, págs. 1633-1639; diciembre, 1978.